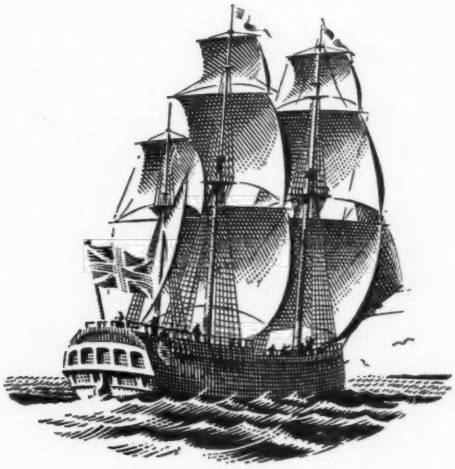
ENDEAVOUR

Revista trimestral, publicada en cinco idiomas, destinada a registrar el progreso de las ciencias al servicio de la humanidad



VOLUMEN XX · 1961

INDICE DE AUTORES

ABRAHAM, E. P. y NEWTON, G. G. F.: Nuevas penicilinas, cefalosporina C y penicilinasa. 92.
ARTICULO ESPECIAL
Los comienzos de la fabricación del fósforo. 40.

BARKER, G. C. y MILNER, G. W. C.: Polarografía. 26.
BONDI, H.: Las ondas gravitatorias. 121.
BULLARD, Sir Edward: El proyecto Mohole. 188.
BUTLER, C. G.: El funcionamiento de la colmena. 5.

DJERASSI, Carl: Dispersión rotatoria óptica. 138.

EDITORIAL
El cincuentenario de la *Max-Planck-Gesellschaft*. 59.
Las profundidades oceánicas. 3.
Sobre el costo de las investigaciones. 119.
Un consejo internacional de las ciencias. 175.
EYLES, V. A.: Sir James Hall (1761–1832). 210.

FARTHING, T. W. *vid.* MCQUILLAN, M. K. y FARTHING, T. W.
FOLKERS, K. *vid.* WAGNER, A. F. y FOLKERS, K.

GLUECKAUF, E.: La separación de isótopos mediante procesos químicos reversibles. 42.
GOREAU, T.: El crecimiento y la calcificación de los corales. 32.

HEYMANN, F. F.: El positronio. 225.

KURSANOV, A. L.: El transporte de sustancias orgánicas en las plantas. 19.

LEWIN, G.: El vacío ultra-elevado. 85.

MASSEY, Sir Harrie: La investigación del espacio. 68.
MCQUILLAN, M. K. y FARTHING, T. W.: El berilio. 11.
MILNER, G. W. C. *vid.* BARKER, G. C. y MILNER, G. W. C.

NAIRN, R. C.: Le detección de proteínas fluorescentes y el método de los anticuerpos fluorescentes. 78.
NEWTON, G. G. F. *vid.* ABRAHAM, E. P. y NEWTON, G. G. F.

O'CONNELL, D. J. K.: El destello verde y fenómenos afines. 131.

PARTINGTON, J. R.: El fuego griego. 162.
PIRENNE, M. H.: Les cuantos de luz y la visión. 197.
PYE, J. D.: La ecolocación en los murciélagos. 101.

RATTEE, I. D.: Colorantes reactivos para la celulosa. 154.

SIRLIN, J. L.: El nucleoïo del núcleo celular. 146.
SJÖRS, H.: Los terrenos turbosos boreales. 217.
STONE, F. G. A.: Compuestos deficientes de electrones. 61.

WAGNER, A. F. y FOLKERS, K.: La química orgánica y biológica del ácido mevalónico. 177.

REVISTA DE LIBROS

ACHESON, R. M.: An Introduction to the Chemistry of Heterocyclic Compounds. 113.
ANDRADE, E. N. DA C.: A Brief History of the Royal Society. 54.
AUSTIN, C. K. (Compilador): Journal of Reproduction and Fertility, Vol. I, No. I, Febrero 1960. 52.

BAKER, R. M. L. Jr. y MAKEMSON, M. W.: An Introduction to Astrodynamics. 167.
BARKER, T. C.: Pilkington Brothers and the Glass Industry. 170.
BASS, A. M. y BROIDA, H. P. (Compiladores): Stabilization of Free Radicals at Low Temperatures. 113.
BERRY, A. J.: Henry Cavendish: His Life and Scientific Work. 54.
BIRD, R. B., STEWART, W. E. y LIGHTFOOT, E. N.: Transport Phenomena. 233.

CHAPMAN, V. J.: Salt Marshes and Salt Deserts of the World. 51.
CLARKE, N. (Compilador): A Physics Anthology. 50.
COATES, G. E.: Organo-Metallic Compounds (2ª edición). 168.

DEAN, J. A.: Flame Photometry. 232.
DE BEER, Sir Gavin: The Sciences were never at War. 53.
DERRY, T. K. y WILLIAMS, Trevor I.: A Short History of Technology, from the Earliest Times to A.D. 1900. 54.
DJERASSI, C.: Optical Rotatory Dispersion. 169.
DRIVER, J. E. (revisada por): Bentley and Driver's Textbook of Pharmaceutical Chemistry (7ª edición). 53.

EMELÉUS, H. J. y ANDERSON, J. S.: Modern Aspects of Inorganic Chemistry (3ª edición). 51.

FALCONER, D. S.: Introduction to Quantitative Genetics. 114.
FIERZ, M. y WEISSKOPF, V. F. (Compiladores): Theoretic a Physics in the Twentieth Century. 232.
FINKBEINER, Daniel T. II: Introduction to Matrices and Linear Transformations. 167.

GILMOUR, D.: The Biochemistry of Insects. 234.
GRASSÉ, P.-P. (Compilador): Traité de zoologie, Vol. V, Parte 2, Bryozaires, Brachiopodes, Chétognathes, Pogonophores, Mollusques. 234.
GREENBERG, D. M. (Compilador): Metabolic Pathways, Vol. I (segunda edición de Chemical Pathways of Metabolism). 234.

HAGERUP, O. y PETERSON, V.: Botanisk Atlas, Vol. II (traducción inglesa de CARTER, H. Gilbert). 234.
HARPER, J. L.: The Biology of Weeds. 52.
HARRIS, H.: Human Biochemical Genetics. 52.
HARTLEY, Sir Harold (Compilador): The Royal Society: its Origins and Founders. 54.
HORSFALL, J. G. y DIMOND, A. E. (Compiladores): Plant Pathology, Vol. II, The Pathogen. 52.

JONES, H.: The Theory of Brillouin Zones and Electronic Structure in Crystals. 112.

KAMLET, M. J. (Compilador): Organic Electronic Spectral Data, Vol. I (1946–52). 233.
KLINGSBERG, E. (Compilador): Pyridine and its Derivatives, Parte I (colaboran BARNES, R. A., BRODY, F. y RUBY, P. R.). 113.

LANDAU, L. D. y LIFSHITZ, E. M.: Electrodynamics of Continuous Media (traducción del ruso de SYKES, J. B. y BELL, J. S.). 167.
LANDSBERG, P. T.: Monographs in Statistical Physics and Thermodynamics, Vol. II, Thermodynamics. 232.
LEWIS, J. J.: Introduction to Pharmacology. 53.

McGraw-Hill Encyclopaedia of Science and Technology, Vols. I–XIV, Aba–Zyt. 166.
MANSKE, R. H. F.: The Alkaloids: Chemistry and Physiology, Vols. VI y VII. 114.

NORD, F. F. (Compilador): Advances in Enzymology, Vol. XXII. 170.

OSMAN HILL, W. C.: Primates, Comparative Anatomy and Taxonomy, Vol. IV, Cebidae, Parte A. 170.

PARTINGTON, J. R.: A History of Greek Fire and Gunpowder. 53.
PASCAL, P. (Compilador): Nouveau traité de chimie minérale, Vol. XV, Uranium et transuraniens, Parte I, Uranium. 113.
PERUCCA, E.: Fisica Generale e Sperimentale (7ª edición, revisada). Vol. I y Vol. II. Parte I y Parte II. 167.
PLEŠEK, J. y ZOBÁČOVÁ, A.: Preparativní reakce v organické chemii. V. Aldolisace a příbuzné reakce (Reacciones en química orgánica preparatoria. Vol. V. Reacciones aldolosácicas y similares). 169.

RAPHAEL, R. A., TAYLOR, E. C. y WYNBERG, H. (Compiladores): Advances in Organic Chemistry: Methods and Results, Vol I. 51.
ROCARD, Y.: General Dynamics of Vibrations. 168.
ROSS ASHBY, W.: Design for a Brain (2ª edición, revisada). 52.
RUDNICK, Dorothea (Compilador): Developing Cell Systems and their Control. 169.
RUSSELL, R. D. y FARQUHAR, R. M.: Lead Isotopes in Geology. 51.

RYSHKEWITCH, E.: Oxide Ceramics, Physical Chemistry and Technology. 234.

SANDERSON, R. T.: Chemical Periodicity. 168.
SLATER, N. B.: Theory of Unimolecular Reactions. 112.
SMALES, A. A. y WAGER, L. R. (Compiladores): Methods in Geochemistry. 169.
STEWARD, F. C. (Compilador): Plant Physiology, Vol. Ia, Cellular Organisation and Respiration. 114.
SYNGE, J. L.: Relativity, the General Theory. 112.

Transactions of the Newcomen Society for the Study of the History of Engineering and Technology, Vol. XXX (1955–56 y 1956–57). 170.

UBBELOHDE, A. R. y LEWIS, F. A.: Graphite and its Crystal Compounds. 113.

UNGNADE, H. E. (Compilador): Organic Electronic Spectral Data, Vol. II (1953–55). 233.

VAN BUEREN, H. G.: Imperfections in Crystals. 168.
VANCINI, C. A.: La Sintesi dell'Ammoniaca. 233.

WILSON, J. G. y WOUTHUYSEN, S. A. (Compiladores): Progress in Elementary Particle and Cosmic Ray Physics, Vol. V. 112.
WITHROW, R. B. (Compilador): Photoperiodism in Plants and Animals. 114.
WOLSTENHOLME, G. E. W. y O'CONNOR, C. M. (Compiladores): Ciba Foundation Symposium on Quinones in Electron Transport. 233.

ZIMAN, J. M.: Electrons and Phonons; The Theory of Transport Phenomena in Solids. 50.

INDICE DE MATERIAS

La clasificación de los artículos por materias va ordenada según el sistema de Clasificación Decimal Universal (Standard británico 1000) (Edición española abreviada, Madrid. 1953). En la página IV aparece una clave alfabética.

06 INSTITUCIONES CIENTIFICAS

061.22(100):5 Un consejo internacional de las ciencias (Editorial). 175.
061.22(43):5 El cincuentenario de la *Max-Planck-Gesellschaft* (Editorial). 59.

5 CIENCIA GENERAL

5:061.22(100) Un consejo internacional de las ciencias (Editorial). 175.
5:061.22(43) El cincuentenario de la *Max-Planck-Gesellschaft* (Editorial). 59.
5.001.891 Sobre el costo de las investigaciones (Editorial). 119.

52 ASTROFISICA. ASTRONOMIA

525:551.51 :629.19 La investigación del espacio. MASSEY, Sir Harrie. 68.

53 FISICA

530.12:531.5 Las ondas gravitatorias. BONDI, H. 121.
531.5:530.12 *Idem.*
533.5:621.52 El vacío ultra-elevado. LEWIN, G. 85.
535.7:612.843.3 Los cuantos de luz y la visión. PIRENNE, M. H. 197.
539.124 El positronio. HEYMANN, F. F. 225.

54 QUIMICA

541.653 Dispersión rotatoria óptica. DJERASSI, Carl. 138.
541.71 Compuestos deficientes de electrones. STONE, F. G. A. 61.
543.253 Polarografía. BARKER, G. C. y MILNER, G. W. C. 26.
543.426 :576.8.097.5 :576.088.5 La detección de proteínas fluorescentes y el método de los anticuerpos fluorescentes. NAIRN, R. C. 78.
546.02 :621.039.32 La separación de isótopos mediante procesos químicos reversibles. GLUECKAUF, E. 42.
546.18:93 :661.631(091) Los comienzos de la fabricación del fósforo. 40.
546.45:669.725 El berilio. MCQUILLAN, M. K. y FARTHING, T. W. 11.
547.458.8:668.81 Colorantes reactivos para la celulosa. RATTEE, I. D. 154.
547.473.2:577.15 La química orgánica y biológica del ácido mevalónico. WAGNER, A. F. y FOLKERS, K. 177.
547.78:577.18 :615.779 Nuevas penicilinas, cefalosporina C y penicilinasa. ABRAHAM, E. P. y NEWTON, G. G. F. 92.

55 GEOLOGIA. GEOFISICA

550.311:551.241 El proyecto Mohole. BULLARD, Sir Edward. 188.
551.241:550.311 *Idem.*
551.345 :581.524.441 :553.97 Los terrenos turbosos boreales. SJÖRS, H. 217.
551.351.5:593.6 :591.134 El crecimiento y la calcificación de los corales. GOREAU. T. 32.
551.46 Las profundidades oceánicas (Editorial). 3.
551.51:629.19 :525 La investigación del espacio. MASSEY, Sir Harrie. 68.
551.593.51 El destello verde y fenómenos afines. O'CONNELL, D. J. K. 131.
552.3:92 Sir James Hall (1761–1832). EYLES, V. A. 210.
553.97:551.345 :581.524.441 Los terrenos turbosos boreales. SJÖRS, H. 217.

57 CIENCIAS BIOLOGICAS

576.088.5 :543.426 :576.8.097.5 La detección de proteínas fluorescentes y el método de los anticuerpos fluorescentes. NAIRN, R. C. 78.
576.312:577.15 El nucleolo del núcleo celular. SIRLIN, J. L. 146.
576.8.097.5 :576.088.5 :543.426 La detección de proteínas fluorescentes y el método de los anticuerpos fluorescentes. NAIRN, R. C. 78.
577.15 :547.473.2 La química orgánica y biológica del ácido mevalónico. WAGNER, A. F. y FOLKERS, K. 177.
577.15:576.312 El nucleolo del núcleo celular. SIRLIN, J. L. 146.
577.18:615.779 :547.78 Nuevas penicilinas, cefalosporina C y penicilinasa. ABRAHAM, E. P. y NEWTON, G. G. F. 92.

58 BOTANICA

581.13 El transporte de sustancias orgánicas en las plantas. KURSANOV, A. L. 19.

581.524.441 :553.97 :551.345 Los terrenos turbosos boreales. SJÖRS, H. 217.

59 ZOOLOGIA

591.134 :551.351.5 :593.6 El crecimiento y la calcificación de los corales. GOREAU, T. 32.

591.185.1:599.4 La ecolocación en los murciélagos. PYE, J. D. 101.

591.552:595.799 El funcionamiento de la colmena. BUTLER, C. G. 5.

593.6:591.134 :551.351.5 El crecimiento y la calcificación de los corales. GOREAU, T. 32.

595.799:591.552 El funcionamiento de la colmena. BUTLER, C. G. 5.

599.4:591.185.1 La ecolocación en los murciélagos. PYE, J. D. 101.

61 MEDICINA

612.843.3:535.7 Los cuantos de luz y la visión. PIRENNE, M. H. 197.

615.779:547.78 :577.18 Nuevas penicilinas, cefalosporina C y penicilinasa. ABRAHAM, E. P. y NEWTON, G. G. F. 92.

62 INGENIERIA. ENERGIA NUCLEAR

621.039.32 :546.02 La separación de isótopos mediante procesos químicos reversibles. GLUECKAUF, E. 42.

621.52:535.5 El vacío ultra-elevado. LEWIN, G. 85.

623.454.7(091) :93 El fuego griego. PARTINGTON, J. R. 162.

629.19:525 :551.51 La investigación del espacio. MASSEY, Sir Harrie. 68.

66/69 INDUSTRIA QUIMICA. METALURGIA

661.631(091) :546.18:93 Los comienzos de la fabricación del fósforo. 40.

668.81 :547.458.8 Colorantes reactivos para la celulosa. RATTEE, I. D. 154.

669.725:546.45 El berilio. MCQUILLAN, M. K. y FARTHING, T. W. 11.

9 BIOGRAFIAS. HISTORIA DE LA CIENCIA

92:552.3 Sir James Hall (1761–1832). EYLES, V. A. 210.

93:623.454.7 (091) El fuego griego. PARTINGTON, J. R. 162.

93:661.631(091) :546.18 Los comienzos de la fabricación del fósforo. 40.

CLAVE ALFABETICA

Abejas 595.799
Acido mevalónico 547.473.2
Análisis por fluorescencia 543.426
Antibióticos 615.779
Anticuerpos 576.8.097
Arrecifes coralinas 551.351
Astronomía 52

Berilio 546.45
Biografías 92
Bioquímica 577.1
Biosíntesis 577.15
Botánica 58

Cefalosporina C 577.18
Célula, nucleolo de la 576.31
Celulosa, colorantes 547.458.8
Citología 576.3
Colorantes reactivos 668.81
Compuestos deficientes de electrones 541.71
Congelación permanente del terreno 551.345
Consejo Internacional de Uniones Científicas 061.22
Corales de arrecife 593.6
Corteza terrestre 551.241
Cuantos de luz en la visión 535.7

Destello verde 551.593.51
Dispersión rotatoria óptica 541.653

Ecolocación de murciélagos 591.185.1
Ecología
  Animal 591.552
  Vegetal 581.52
Espacio, investigación del 629.19
Estereoquímica 541.6

Física 53
Fisiología
  Animal 591.1
  Humana 612
  Vegetal 581.1
Fósforo 546.18
Fuego griego 623.457

Geofísica 551.5
Geología 552/553
Gravitación 531.5

Hall, Sir James 92
Histología 576.72
Historia de la ciencia 93

Industria química 66
Ingeniería militar 623
Inmunología 576.8.097
Investigaciones científicas, costo 5.001.891
Isotópos, separación química 546.02

Max-Planck-Gesellschaft 061.22
Medicina 61
Metalurgia
  Berilio 669.725
Meteorología 551.5
Mohole 550.311
Murciélagos, ecolocación 599.4

Nucleolo del núcleo celular 576.312

Oceanografía 551.46
Oído
  Murciélagos 591.185
Ondas gravitatorias 531.5
Optica fisiológica 535.7

Penicilinas 547.78
Plantas
  Transporte de sustancias orgánicas 581.13
Polarografía 543.253
Positronio 539.124
Proteínas, detección de 576.8.097.5

Química 54

Relatividad 530.12
Rocas ígneas 552.3

Sensibilidad del ojo 612.843.3
Separación de isótopos 621.039.32

Técnica del vacío 621.52
Tecnología nuclear 621.039
Terrenos turbosos 581.524.441
Turba 553.97

Vacío ultra-elevado 533.5
Visión 612.84

Zoología 59

Impreso en la Gran Bretaña en THE KYNOCH PRESS, *Witton, Birmingham, 6, para los editores*
IMPERIAL CHEMICAL INDUSTRIES LIMITED, *Londres, S.W.1*

ENDEAVOUR

Revista trimestral, publicada en cinco idiomas, destinada a registrar el progreso de las ciencias al servicio de la humanidad

---

VOLUMEN XX Enero 1961 NUMERO 77

SUMARIO

551.46:070.432
Editorial: Las profundidades oceánicas 3

591.552:595.799
El funcionamiento de la colmena — C. G. BUTLER — 5

669.725:546.45
El berilio — M. K. McQUILLAN y T. W. FARTHING — 11

581.13
El transporte de sustancias orgánicas en las plantas — A. L. KURSANOV — 19

543.253
Polarografía — G. C. BARKER y G. W. C. MILNER — 26

593.6:591.134:551.351.5
El crecimiento y la calcificación de los corales — T. GOREAU — 32

661.631(091):546.18:93
Los comienzos de la fabricación del fósforo — 40

621.039.32:546.02
La separación de isótopos mediante procesos químicos reversibles — E. GLUECKAUF — 42

049.3
Revista de libros 50

Revistas resumidas de libros 55

Notas sobre los colaboradores 56

Libros recibidos .. ..Cubierta III

Redactor-jefe: TREVOR I. WILLIAMS
Redactores auxiliares: G. N. J. BECK (*Ediciones extranjeras*)
W. A. OSMAN

Imperial Chemical Industries Limited, Millbank, Londres, S.W.1
Toda comunicación a los editores debe dirigirse a North Block, Thames House, Millbank, Londres, S.W.1

Las profundidades oceánicas

La imagen que generalmente se tiene aún de la ciencia es la de un estudio enteramente objetivo en el que todo avance es un preludio de otros descubrimientos y en el que todo progreso en una dirección se aplica rápida y plenamente a otras. Apenas necesitamos decir que tal noción se halla muy alejada de la realidad: de todos es sabido que mientras ciertos estudios progresan activamente, otros están extrañamente abandonados. Uno de tales abandonos se observa en el campo de la oceanografía. Es curiosa paradoja que en tanto que poseemos numerosos datos sobre los lugares más apartados e inhóspitos de la Tierra y que, a todas luces, nos hallamos a punto de iniciar la exploración del espacio interestelar, aún sabemos muy poco sobre las oscuras profundidades oceánicas que, por así decirlo, rodean nuestras tierras civilizadas.

Afirmar que se ha trabajado muy poco en oceanografía, si se tiene en cuenta el interés intrínseco y la importancia de tales estudios, no significa que se desdeñe lo que de tales trabajos se ha conseguido. Algunos de los viajes más memorables de la historia tuvieron como propósito, total o parcialmente, realizar estudios oceanográficos. Son ejemplos conocidos los de Edmond Halley, a finales del siglo XVII, quien, corriendo grandes riesgos, penetró hasta la latitud 52° 30′ S, y de James Cook, cuyos épicos viajes de exploración científica le hicieron circumnavegar el globo dos veces. Más tarde, otra gran expedición británica, la del *Challenger* (1872–76), sirvió, a juicio de los más, para establecer las bases de la moderna oceanografía: en el curso de esa exploración se recorrieron más de 100 000 kilómetros — lo que es aún un récord para un viaje de tal naturaleza — y los resultados ocupan 50 extensos volúmenes que continuan siendo la obra clásica en esta materia. Más recientemente, los navíos del Comité del *Discovery* han contribuido notablemente a nuestros conocimientos sobre los oceanos meridionales. La oceanografía ha sido, desde hace ya mucho, ciencia verdaderamente internacional; todas las grandes naciones marítimas han financiado importantes expediciones. Entre otras citaremos el famoso viaje de Nansen al Artico en el *Fram* (1893–96); la expedición del *National* alemán en 1889, notable por las clásicas investigaciones de Hensen sobre la distribución del plancton; la del *Belgica* (1897–99), primer navío que invernó en los hielos antárticos; la expedición del *Dana* (1928–30), de la Fundación Carlsberg; las extensas investigaciones sobre el magnetismo del barco norteamericano *Carnegie*; y los estudios en el Pacífico realizados por el *Scripps Institute of Oceanography*. Han sido tales viajes importante fuente de nuevos conocimientos, pero de modo alguno la única: los navíos encargados de investigaciones pesqueras, los institutos de oceanografía, las estaciones de biología marina, y los barcos encargados de realizar mensuraciones y de lanzar cables, todos ellos han contribuido y siguen contribuyendo al progreso de esos estudios.

El que a pesar de todo ello nuestros conocimientos sean todavía muy escasos nos da la medida del problema. Más de la mitad de la superficie terrestre se halla cubierta por más de mil brazas de agua, y muchos millones de kilómetros cuadrados se hallan a profundidades tres veces mayores. Sin embargo, esas cifras no significan el insalvable obstáculo que pudieran parecer a primera vista. El progreso de la oceanografía no depende de la observación completa, horizontal y vertical, de esas vastas regiones, así como la geología no depende tampoco del estudio de cada kilómetro cuadrado de la superficie terrestre. Puede llegarse a establecer importantes principios mediante la concentración del esfuerzo en objetivos limitados: en la actualidad el mayor problema es determinar las más fructíferas direcciones en la investigación. Además, los avances en otras ramas de la ciencia han incrementado enormemente la facilidad con que pueden realizarse y evaluarse ciertos tipos de medida. Citemos un solo ejemplo: la eco-sonda hace posible un registro continuo de profundidades desde un navío en movimiento, lo que significa un progreso incalculable sobre los antiguos métodos a base de plomadas. En otro campo también se han realizado notables avances por medio de las perforaciones de los depósitos en los fondos oceánicos. Hoy también se usan gravímetros de bordo y magnetómetros remolcados.

Pero la irregularidad en el progreso científico en ninguna rama se manifiesta tan claramente como en la de la oceanografía. El progreso en ella depende ciertamente del aumento de los trabajos observacionales y experimentales cuidadosamente planeados en el mar; pero ya no es exacto decir que «sólo los que afrontan los riesgos pueden comprender su misterio»; muchas investigaciones básicas sobre la física marina pueden realizarse mucho mejor en un laboratorio en tierra firme. Casi diríamos

que el interés por el aspecto económico de esos problemas — tales como los que se refieren a la industria pesquera — ha conducido a un enfoque excesivamente directo en algunas ramas de la oceanografía. Sin embargo, hay ya indicaciones de que ciertos métodos, tanto analíticos como observacionales, empiezan a recibir creciente atención; además, hoy se hacen observaciones para comprobar ciertas teorías. Por ejemplo, se han hecho considerables progresos en la teoría de la generación, transmisión y disipación de las olas. Tales conocimientos, adecuadamente aplicados, pueden tener gran importancia práctica tanto para los ingenieros encargados de las construcciones costeras como para los constructores de buques, cuyo enfoque hasta ahora ha sido, por necesidad, principalmente empírico. Existe el riesgo de que la necesidad de considerables fondos para finanziar un navío oceanográfico lleve a una insuficiente aplicación de fondos para los trabajos de interpretación de los resultados. Cierto es que el trabajo de los navíos es característica esencial de la oceanografía, pero eso no es todo: un enfoque racional de sus problemas exije la cooperación de científicos de muchas ramas y el establecimiento de laboratorios terrestres bien y variadamente equipados.

En los casos oportunos, el trabajo de laboratorio en problemas oceanográficos tiene interés en no pocas direcciones. En primer lugar se pueden esperar importantes resultados con un costo relativamente bajo. En segundo, no faltan las posibles aplicaciones de los nuevos conocimientos sobre los principios fundamentales. En cuanto a la construcción naval, es hoy ya claro que los progresos teóricos pueden contribuir a la construcción de cascos adecuados a las condiciones de los mares por los que han de navegar. Las posibilidades para las investigaciones pesqueras son evidentes si consideramos que los mares, aunque cubren el 72% de la superficie del globo sólo aportan el 1% de los alimentos producidos. También la meteorología, así como la técnica de la eliminación de desechos radiactivos e industriales en el mar, están interesadas en conocer los factores que rijen las corrientes oceánicas profundas.

La oceanografía física quizás haya realizado ya sus más importantes aportaciones a la navegación, en el sentido que el creciente tamaño y fuerza de los buques mejoran su navegabilidad en difíciles condiciones. En esta rama será dudoso que se realicen progresos semejantes en sus efectos a la carta de Franklin de la Corriente del Golfo, mediante cuyo uso se acortó la travesía del Atlántico hacia Europa en casi dos semanas, o las famosas cartas de vientos y corrientes de Maury (1847–60). Pero el Almirante Smyth, fundador de la *Royal Geographical Society* manifestó excesivo optimismo cuando en 1854 proclamó que la colaboración de la ciencia y el arte de navegar había reducido a esclavitud los elementos; un mejor conocimiento de vientos y corrientes, mareas y olas servirá aún sin duda al marino para ganar tiempo en sus viajes y evitar los peligros.

La oceanografía se ha caracterizado siempre por ser campo de fructífera cooperación internacional. La orden de Franklin de que, a pesar de la Guerra de Independencia norteamericana, los navíos de la flota no debían molestar al Capitán Cook durante sus viajes de exploración científica es un ejemplo notable de tal tradición. Hoy existen numerosos organismos que fomentan la investigación oceanográfica; entre ellos están el Consejo Internacional para la Exploración del Mar, la Asociación Internacional de Oceanografía Física, el Consejo Internacional de Uniones Científicas, la UNESCO, el Organismo Internacional de Energía Atómica, la Organización Meteorológica Mundial, y la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Tal multiplicidad de entidades es buena señal de la aceptación de importantes consecuencias de la investigación oceanográfica; es además evidente que ciertos estudios oceanográficos de gran extensión — como los que en la actualidad se proyectan en el Oceano Indico — exigen cooperación económica y administrativa. Pero existe también el peligro de que la preocupación por los grandes programas internacionales, promovidos al menos en parte por necesidades prácticas inmediatas, pueda causar perjuicio a las investigaciones fundamentales de individuos o reducidos grupos nacionales de investigación de las que pueden esperarse importantes resultados con un costo reducido.

Los fondos que en la actualidad se dedican a investigaciones fundamentales en oceanografía son apenas nada en comparación con las consecuencias prácticas que de tales investigaciones dependen. Esperemos, sin embargo, que al aumentarse dichos fondos se tengan en cuenta no sólo las grandes expediciones internacionales sino también las necesidades de los investigadores individuales.

El funcionamiento de la colmena

C. G. BUTLER

Un enjambre de abejas es una integración de individuos capaces de distinguir los miembros de otros enjambres. Una abeja puede además transmitir información detallada sobre la situación e índole de focos alimenticios. Las obreras provocan la formación de una nueva reina únicamente cuando la vieja no cumple ya su función. Tan curiosas actividades sociales son estudiadas en este artículo a la luz de la moderna biología. Gracias al reciente descubrimiento de la naturaleza química de la llamada «sustancia real» es hoy posible explicar científicamente la producción de reinas. Las fotografías son de Treat Davidson.

Hace unos años G. D. Glynne-Jones [1] soltó dentro de un invernadero 200 abejas obreras escogidas al azar. A las dos horas habían formado enjambre en un rincón del techo, y una pequeña proporción de ellas iniciaron la recolección de alimento en un plato de almíbar. Todas las abejas de este ensayo habían sido marcadas con pintura; gracias a ello se demostró que sólo unas doce abejas iban y venían al enjambre para libar almíbar que compartían con sus compañeras antes de volver por más. Esta situación se prolongó durante los tres días que duró la observación. Así, las 200 abejas demostraron cierta integración social rudimentaria, a pesar de carecer de reina, de panal y de crías; el hecho de que sólo algunas recolectasen para todas reveló la inmediata operación de una división del trabajo. La división del trabajo según actividades como fabricación de panales (Fig. 10), alimentación de larvas (Fig. 3), cuidado de la reina (Figs. 11 y 12), y recolección de alimentos, es un hecho bien establecido en toda colmena.

Hasta hace poco se aceptaba la sencilla teoría establecida por G. A. Rösch [2] hace 30 años según la cual toda abeja obrera desempeña a lo largo de su vida una serie de cometidos diferentes con arreglo a una sucesión determinada, empezando como nodriza de larvas y acabando de cosechera. Supuso el citado autor que cada ocupación era función de una determinada edad y se quiso encontrar una relación entre cada actividad específica y el grado de secreción de ciertas glándulas, suponiendo que las respectivas secreciones de éstas condicionaban las distintas actividades sociales. Este mecanismo habría de ser un tanto lábil para adaptarse a las especiales necesidades de la sociedad en un momento dado, y por ello Rösch supuso que el tiempo invertido por cada abeja en determinado tipo de trabajo podía ser variable.

La inexactitud de esa teoría quedó demostrada en 1952, cuando M. Lindauer [3] publicó los resultados de sus estudios con obreras marcadas y sometidas a cuidadosa observación durante casi toda su vida. No existe tal sucesión regular de ocupaciones. Una misma abeja desempeña diversos tipos de trabajo en un mismo día. Todo lo más, la vida de una obrera puede dividirse en 3 períodos, y no en 7 u 8 como antes se creía. Durante los 2–3 primeros días de vida, la obrera parece dedicarse exclusivamente a limpiar celdas donde la reina ha de repetir puestas; las dos semanas siguientes — más o menos — merodea por la colmena, desempeñando diversos papeles; pasado ese tiempo, hasta que muere, se dedica a defender la colmena y cosechar alimento. Así, J. B. Free e Y. Spencer-Booth [4] han demostrado posteriormente que, en verano, las obreras pasan el tiempo trabajando dentro de la colmena durante sus primeros 18 días de vida, convirtiéndose luego en abejas campestres durante los 7–10 días restantes de su existencia.

Según Lindauer, las abejas invierten dos tercios de su vida casera en descansar o en patrullar por los panales; según el mismo autor la actividad de patrulla — que antes no se conocía — permite que la obrera perciba qué labores son necesarias y el animal se pone al trabajo como consecuencia de estímulos simples. En apoyo de su teoría, Lindauer aporta ejemplos en que las obreras individuales trabajan en completa independencia unas con respecto a las otras. Concretamente, la fabricación de la cubierta con que las abejas tapan celdas con larvas ya crecidas, es una ocupación en la que participan en forma fortuita y sucesiva numerosas obreras. Una vez se contaron 657 visitas de diversas obreras durante 6½ horas en total antes de que la cubierta quedara acabada. En ocasiones una obrera quita la partícula cérea que otra había colocado con todo celo un momento antes, utilizándola para taponar otra celda contigua. La misma falta de cooperación se percibe a

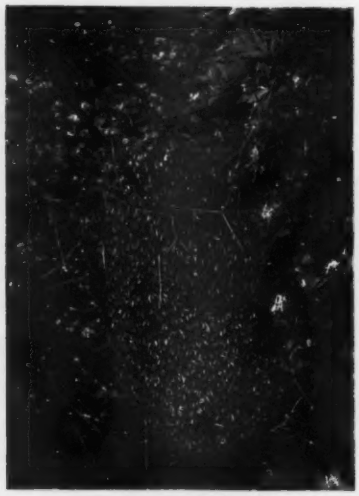


FIGURA 1 – *Enjambre.*

FIGURA 2 – *Colmena al aire libre. Lo corriente es que las abejas se establezcan dentro cavidades oscuras, por ejemplo en árboles huecos.*

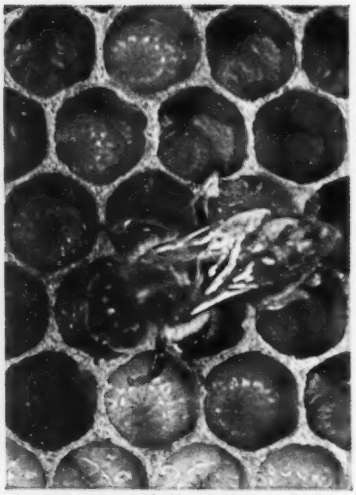


FIGURA 3 – *Abeja nodriza sobre un panal en el que se observan larvas y celdas con huevo.* (× 3)

FIGURA 4 – *Abdomen de una obrera, mostrando las escamas de cera.* (× 11)

FIGURA 5 (*derecha*) – *Reinas luchando.* (× 2¼)

FIGURA 6 – *Lengua de una obrera que cosecha nectar.* (× 11)

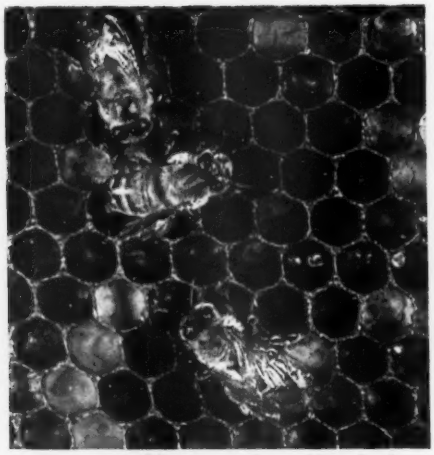


FIGURA 7 – *Obreras en las celdas donde se acumula el polen.* (× 1½)

FIGURA 8 – *Cosechera (con polen) y guardianas en la piquera de la colmena.* (× 2)

FIGURA 9 – *Abeja cosechera arribando a una flor; nótense las bolitas de polen por el cuerpo, y el cargamento de polen en las patas posteriores.* (× 2)

FIGURA 10 – *Construcción de panales.*

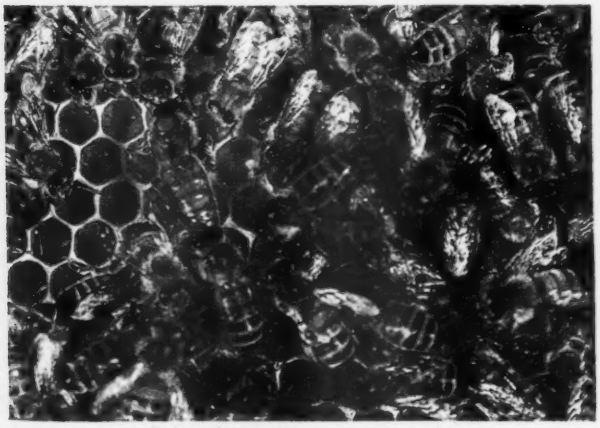


FIGURA 11 – *Reina (marcada con mota verde) y su «corte»; junto a su abdomen una obrera está colectando probablemente sustancia real; cerca de su cabeza otra que la alimenta. (Tamaño natural)*

FIGURA 12 – *Reina con su «corte»: la reina es examinada por las obreras, que a tal fin utilizan sus antenas.* (× 2½)

menudo cuando un grupo de guardianas expulsan o interceptan algún intruso en la colmena; cada cual tira del intruso en una dirección diferente [5].

Parece que Lindauer está en lo cierto cuando afirma que cada abeja reacciona independientemente frente a los distintos estímulos que recibe de larvas pequeñas, larvas crecidas, abejas intrusas, celdas a medio taponar, etc. Pero, por otro lado, parece que la abeja tiende a invertir mayor cantidad de tiempo en aquellas ocupaciones para las que se halle mejor predispuesta en cada momento de su vida. Así, una abeja con glándulas céreas en plena secreción (Fig. 4) invierte acaso la mayor parte del tiempo en construir panales.

Es difícil explicar el mecanismo que determina la división en abejas campestres y abejas caseras. Quizá, de acuerdo con C. R. Ribbands [6], la transformación de nectar en miel y la construcción de panales que realizan ante todo las abejas caseras más viejas tenga alguna relación con la creciente tendencia a irse apartando de la colmena, tendencia que al fin culmina en una actividad cosechera.

Ribbands [7] ha descubierto que anestesiando jóvenes obreras con anhídrido carbónico, es posible provocar prematuramente la actividad cosechera, y O. Mackensen [8] probó que reinas vírgenes, cuya puesta no comienza en condiciones normales antes de las 3 semanas de edad, al ser anestesiadas con igual anhídrido a la semana de edad, empiezan a poner pocos días después, haciéndolo en igual edad que reinas fecundadas en condiciones normales. Parece pues que la anestesia con anhídrido carbónico determina algo así como un envejecimiento, pero Ribbands [7] llega a otro resultado, aunque en todo caso tal anestesia reduce la vida media probable de la obrera por el simple hecho de movilizarla prematuramente para una ocupación tan peligrosa como es la de cosechera. Acaso la anestesia carbónica produce un repentino cambio en el metabolismo de la abeja, similar al que quizá sobreviene cuando la reina es fecundada y comienza a poner, o al más gradual que sufre la obrera cuando sustituye ocupaciones caseras por ocupaciones campestres.

Hemos dicho ya que la vida media estival de una obrera dura 4 semanas. Las obreras que se desarrollan en otoño viven mucho más tiempo [4]. En invierno, cuando no hay trabajo de crianza, las obreras acumulan grasa y proteínas, y A. Maurizio ha demostrado [9] que la mayor longevidad invernal parece tener relación con dicha acumulación de sustancias. Es posible obtener abejas longevas en pleno verano a partir de enjambres sin reina; en esas condiciones las abejas acumulan grasa y proteínas.

Sólo las abejas criadas en otoño sobreviven el invierno. Momento crítico para las colmenas es la primavera, cuando las abejas invernales mueren rápidamente en tanto se va criando la nueva generación. La muerte de numerosos enjambres durante los primeros meses de ciertos años (por ejemplo en 1959), pudieran muy bien explicarse por agotamiento de proteínas. La insuficiencia en proteínas surgiría cuando durante el verano precedente se hiciera poca cosecha de polen; entonces las abejas viejas mueren probablemente antes de que haya suficientes abejas jóvenes para hacer viable la colmena.

El sistema de división laboral a base de obreras merodeadoras, prestas a cualquier ocupación, parece depender de factores muy fortuitos, pero, no obstante, el sistema debe resultar eficaz y lo bastante flexible para adaptarse a fuertes cambios. Por ejemplo, cuando se establece una sociedad experimental a base exclusiva de cosecheras, inmediatamente una parte de éstas revierte al oficio de nodrizas y a otras ocupaciones caseras [10]; por el contrario, si el enjambre experimental se compone sólo de jóvenes abejas caseras, enseguida una parte de éstas inician actividades campestres en edad anormalmente precoz [11, 12].

Cuando la cosechera de tipo medio sale por primera vez de la colmena, no se lanza sin más de flor en flor buscando alimento. Muy pocas abejas abandonan la colmena antes de ser estimuladas por el lenguaje-danza de cosecheras ya experimentadas [3]. De éstas aprenden aquéllas que hay determinado tipo de alimento, con determinado aroma, y que el alimento se encuentra a determinada distancia y en cierta dirección con respecto a la colmena [13–17]. Sólo una reducida proporción de cosecheras salen de la colmena sin saber donde hay alimento. Su misión es descubrir nuevos sitios donde cosechar. Dichas abejas exploradoras propenden a visitar pocas veces cada fuente alimenticia, pasando enseguida de una conocida a otra nueva, en tanto que las abejas cosecheras ordinarias explotan al máximo cada fuente [18]. Las exploradoras son atraídas por pequeños objetos de color vivo (especialmente azul y amarillo) ya se trate de flores o de discos de papel, aunque rara vez se posan en éstos, a menos que despidan aroma [19]. La abeja exploradora revolotea primero sobre la flor, y, una vez tomado su aroma, se posa y con la lengua busca nectar por todo resquicio (Fig. 6). Si el nectar abunda, toma una carga de él y regresa a la colmena, donde, mediante característico lenguaje-danza [13–17] transmite la

buena nueva a otras abejas, reclutando algunas de ellas para explotar el venero.

Cuando una abeja descubre rica fuente alimenticia, tiene la costumbre de exponer la glándula odorífera, y, esparciendo así su propia sustancia odorante facilita la búsqueda a las cosecheras. Dicho olor atrae a toda clase de abejas, pero más aún a las de la propia colmena [20, 21]. Puede hablarse de una atracción olfativa diferencial que, según H. Kalmus y C. R. Ribbands [21] se basa en diferencias odorantes, de modo que cada enjambre posee un olor característico, común a todos sus miembros y distinto del de otros enjambres. Demostraron también dichos autores que el olor comunal depende de la clase de alimento que han estado acarreando las abejas. Aunque en un momento dado concurran varios enjambres en el mismo colmenar, los miembros de cada enjambre toman diferentes proporciones de nectar de las diversas clases de flores a su alrededor. La contraprueba de esta teoría se podría obtener obligando a compartir una única fuente alimenticia a varios enjambres, y viendo si todos adquieren idéntico olor. Es lo que hizo Ribbands [6] al trasladar a un brezal puro de *Calluna vulgaris* varias colmenas cuyas reservas alimenticias habían sido previamente vaciadas; al cabo de dos meses estos enjambres adquirieron al parecer todos el mismo olor, y era posible intercambiar libremente abejas entre unos y otros.

Gracias a ese aroma comunal, las abejas guardianas pueden desempeñar mejor su papel frente a abejas intrusas, a quienes saben distinguir de sus propias hermanas [22, 23]. En cambio, las reinas no parecen participar del olor común a sus obreras, y éstas son incapaces de distinguir entre su propia reina fecundada y otras reinas similares pertenecientes a otros enjambres que se hayan introducido en su propia colmena. En todo caso, si aprecían diferencias entre unas y otras reinas, esto nada les importa [24]. Sin embargo, ciertamente las obreras son capaces de distinguir por vía olfativa entre reinas fecundadas y reinas vírgenes [25], y son atraídas por el olor de una reina muerta aunque lleve ya muerta varios meses [26].

Cuando una reina rival penetra en una colmena, la titular sale a su encuentro también guiada probablemente por su olfato, según ocurre, por ejemplo, en el caso de reinas vírgenes criadas para enjambrar. Así, el olor de la contraria facilita su eventual destrucción (Fig. 5), a menos de que las obreras impidan el encuentro de las rivales. También parece verosímil que las obreras enjambradas (Fig. 1) sepan por el olor que ésta despide que llevan consigo a su reina. Lo cierto es que si la reina no sale con el enjambre, o si no se aloja dentro del mismo cuando éste se apelotona, las obreras pronto notan su ausencia y regresan a su vieja colmena.

Cuando las obreras pierden la reina, proceden a criar una nueva, o, a veces, optan por asociarse a otro lote de obreras que posean reina. En términos generales, la presencia de una reina ponedora en la colmena, basta para inhibir el desarrollo de los ovarios de las obreras, y también la cría de reinas por éstas. Pero esta inhibición no es provocada directamente por el olor continuo a reina, ni tampoco por la percepción visual o auditiva de ésta; tal inhibición ocurre sólo cuando algunas abejas obreras mantienen contacto frecuente con la reina [27–30]. En vista de esto, nosotros sugerimos [29] que en cada colmena hay algunas obreras que toman algo de la reina — la «sustancia real» — que luego comparten con las restantes, llegando a recibir cada obrera la cantidad suficiente para que queden inhibidos sus propios ovarios y el instinto de criar reinas. La citada sustancia real debe hallarse repartida por todo el cuerpo de la reina, y las obreras deben tomarla chupando; al menos esto parece haberse demostrado con un experimento que consistió en dejar que pequeños grupos de obreras tocaran distintas porciones reducidas del cuerpo de la reina por 2–3 días cada vez [29] (Fig. 11). La sustancia real puede obtenerse también en los buches de obreras atrapadas cuando lamen a la reina; y es casi seguro que sea compartida por todos los miembros del enjambre a través del alimento regurgitado [31].

Una serie de experimentos han acusado relación cuantitativa entre la acumulación de sustancia real y la inhibición para criar reinas. Por fin, en 1957, gracias a un nuevo método bioanalítico bastante sensible, pudo demostrarse que el extracto alcohólico de sustancia de reina fecundada, dado a comer a obreras sin reina las inhibe de construir celdas reales [32]. Conocida la existencia de la sustancia real, se presentó el problema de averiguar su procedencia. El mayor tamaño de las glándulas mandibulares de la reina llevó a C. G. Butler y J. Simpson [33] a buscar y encontrar en ellas la sustancia real, llegando a la conclusión de que la reina reparte por todo su cuerpo dicha sustancia cuando se acicala.

En condiciones naturales, las reinas nuevas son criadas para sustituir a la vieja por simple reemplazamiento, o en virtud de un enjambrado (el reemplazamiento consiste en sustituir una por otra

sin que ocurra enjambrazón). Mucho se ha especulado para explicar uno y otro tipo de sustitución. Hoy no queda duda de que la cría de reinas que precede a tales sustituciones sobreviene a causa de una fuerte aminoración en la cantidad de sustancia real que reciben las obreras [35]. Cuando va a haber enjambrazón, ésta parece producirse de dos modos. Uno, por superpoblación, al aumentar demasiado el número de obreras, pues entonces éstas llegan a recibir cada una insuficiente cantidad de sustancia real, aunque la reina la produzca en abundancia en sus glándulas mandibulares, y esto, a su vez, bien porque las abejas que lamen la reina no pueden distribuir la sustancia debido al agolpamiento, o bien porque la propia aglomeración de abejas estorba la necesaria labor de acicalamiento en la reina. El segundo modo se da en colonias no superpobladas, donde sobreviene la construcción de celdas preparatorias para enjambrazón si la reina pasa por un período de escasa secreción.

Reinas destronadas y reinas que acompañan enjambres de colmenas no superpobladas, contienen la cuarta parte de sustancia real que posee en promedio una reina fecundada ponedora, mientras que las reinas de los enjambres en colmenas superpobladas llegan a tener una cantidad aproximada a la de ésta [35].

La sustancia real ha sido aislada en forma de cristales céreos. Bastan 0,13 μg de cristal para inhibir durante 24 horas o más en una obrera la tendencia a criar reinas [36]. La sustancia cristalina fue identificada por los autores citados como ácido 9-oxodec-2-enóico:

$$CH_3.CO(CH_2)_5CH{:}CH.COOH$$

y la pudieron sintetizar, siendo el producto sintético tan activo biológicamente como el natural [37].

Resumiendo, el eficiente desenvolvimiento de la actividad en una sociedad de abejas (Fig. 2) se explica en buena medida por: *a*) división del trabajo entre reina y obreras y entre éstas; *b*) atracción mutua entre todas las obreras y entre las obreras respecto de la reina; *c*) sistema de comunicación entre las obreras gracias al cual se retransmiten información sobre los focos alimenticios; *d*) método que permite a las obreras de un enjambre distinguir entre ellas mismas y las abejas intrusas, esencial para salvaguardar la colmena; *e*) sistema de control que evita el desarrollo ovárico de obreras y la crianza de reinas por éstas, en tanto haya una reina satisfactoria, pero que también facilita la sustitución de la reina vieja por otra joven, así como el fenómeno de la enjambrazón, en caso de reinar condiciones favorables.

REFERENCIAS

[1] Glynne-Jones, G. D. Comunicación personal.
[2] Rösch, G. A. *Z. vergl. Physiol.*, **2**, 571, 1925.
[3] Lindauer, M. *Ibid.*, **34**, 299, 1952.
[4] Free, J. B. y Spencer-Booth, Y. *Proc. R. ent. Soc. Lond., A*, **34**, 141, 1959.
[5] Butler, C. G. y Free, J. B. *Behaviour*, **4**, 263, 1952.
[6] Ribbands, C. R. «The behaviour and social life of honeybees», Bee Research Association Ltd., Londres. 1953.
[7] *Idem. J. exp. Biol.*, **27**, 302, 1950.
[8] Mackensen, O. *Glean. Bee Cult.*, **79**, 273, 1951.
[9] Maurizio, A. *Bee World*, **31**, 9, 1950.
[10] Moskovltevic, V. *Ibid.*, **21**, 39, 1940.
[11] Nelson, F. C. *Amer. Bee J.*, **67**, 242, 1927.
[12] Gontarski, H. *Umschau*, **49**, 310, 1949.
[13] von Frisch, K. *Zool. Jber. Abt.* 3, **40**, 1, 1923.
[14] *Idem. Öst. zool. Z.*, **1**, 1, 1946.
[15] *Idem. Experientia*, **2**, 397, 1946.
[16] *Idem. Ibid.*, **5**, 142, 1949.
[17] *Idem. Naturwissenschaften*, **38**, 105, 1951.
[18] Oettingen-Spielberg, T. *Z. vergl. Physiol.*, **31**, 454, 1949.
[19] Butler, C. G. *Proc. roy. Soc. Lond., B.*, **138**, 403, 1951.
[20] von Frisch, K. y Rösch, G. A. *Z. vergl. Physiol.*, **4**, 1, 1926.
[21] Kalmus, H. y Ribbands, C. R. *Proc. roy. Soc. Lond., B*, **140**, 50, 1952.
[22] Butler, C. G. y Free, J. B. *Behaviour*, **4**, 263, 1952.
[23] Ribbands, C. R. *Proc. roy. Soc. Lond., B*, **142**, 514, 1954.
[24] Butler, C. G. y Simpson, J. *Bee World*, **37**, 105, 1956.
[25] Butler, C. G. «The World of the Honeybee». Collins, Londres. 1954.
[26] *Idem. Experientia*, 1960. (En prensa.)
[27] Huber, F. «Nouvelles observations sur les abeilles» (2ª edición), 1914. Dadant, Hamilton, Illinois. 1926.
[28] Müssbichler, A. *Z. vergl. Physiol.*, **34**, 207, 1952.
[29] Butler, C. G. *Trans. R. ent. Soc. Lond.*, **105**, 11, 1954.
[30] de Groot, A. P. y Voogd, S. *Experientia*, **10**, 384, 1954.
[31] Butler, C. G. *Proc. R. ent. Soc. Lond., A*, **31**, 12, 1956.
[32] Butler, C. G. y Gibbons, D. A. *J. Insect Physiol.*, **2**, 61, 1958.
[33] Butler, C. G. y Simpson, J. *Proc. R. ent. Soc. Lond., A*, **33**, 120, 1958.
[34] Butler, C. G. *Insectes sociaux*, **4**, 211, 1957.
[35] *Idem. Proc. R. ent. Soc. Lond., A*, **35**. (En prensa.)
[36] Butler, C. G., Callow, R. K. y Johnston, N. C. *Nature, Lond.*, **184**, 1871, 1959.
[37] Callow, R. K. y Johnston, N. C. *Bee World*, **41**, 152, 1960.

El berilio

M. K. McQUILLAN y T. W. FARTHING

El berilio se conoce desde finales del siglo XVIII y se utilizó por algún tiempo en aleaciones con cobre, pero lo que ha dado importancia a la preparación y metalurgia de este metal es el desarrollo de la energía atómica. Su bajísima sección de captura para neutrones hace al metal valioso como vaina para las varillas de combustible en los reactores refrigerados a gas. La metalurgia del metal, debido a sus propiedades físicas y a su alta toxicidad, presenta una serie de características especiales.

El mineral berilo, que da al berilio su nombre y que todavía es el único mineral del que se puede extraer comercialmente el berilio, es conocido desde hace miles de años, bien como piedra semipreciosa o en su forma de monocristal verde como esmeralda. La historia del metal es, sin embargo, mucho más corta. Fue aislado en 1798 por Vauquelin, pero su aparición como material industrial ocurrió sólo hace unos 30 años cuando se observó que la adición de pequeñas cantidades de berilio al cobre podía darle la resistencia y elasticidad que le faltan al cobre puro, sin destruir su alta conductividad eléctrica y térmica, de la que tantos usos del cobre dependen.

Tres cuartas partes de todo el berilio extraído son aún consumidas en aleaciones con cobre, aunque en los últimos quince años el interés por el metal puro ha aumentado, a causa de su extraordinaria combinación de propiedades, como material para ser utilizado en reactores nucleares.

Desde el punto de vista de un ingeniero nuclear, la propiedad más importante del berilio es su baja absorción de neutrones térmicos, la más baja de todos los metales usados en estructuras. Las reacciones nucleares en los reactores se propagan por medio de neutrones; así, el rendimiento de un reactor nuclear dependerá de mantener mínima la absorción accidental y la pérdida de neutrones. La absorción de neutrones es por tanto uno de los principales factores que determinarán la elección de los materiales de un reactor, y el berilio es naturalmente la elección obvia. Tiene además un peso atómico muy bajo, lo que le hace útil como moderador, que es el material que cubre el combustible y sirve para frenar los neutrones producidos en el proceso de fisión para que puedan reaccionar con otros núcleos de uranio.

Aunque desde el punto de vista de la ingeniería nuclear la característica principal del berilio es su baja absorción de neutrones, es también interesante considerar su comportamiento general bajo un bombardeo de neutrones ya que esto gobernará en gran parte el comportamiento físico del metal en un reactor. Cuando se bombardea el berilio con neutrones rápidos (alrededor de 2 MeV) las reacciones nucleares principales son las que generan helio y tritio (^3H):

1. (n, 2n) $^9Be + n \longrightarrow {}^8Be + 2n$ (200 milibarnios)

$$^8Be \longrightarrow 2\,{}^4He$$

2. (n, α) $^9Be + n \longrightarrow {}^6He + {}^4He$ (50 milibarnios)

$$^6He \xrightarrow{\beta} {}^6Li$$

$$^6Li + n\ (\text{térmico}) \rightarrow {}^4He + {}^3H \quad (950\ \text{barnios})$$

$$^3H \xrightarrow{\beta} {}^3He$$

(1 barnio = 10^{-24} cm^2)

Los experimentos de irradiación sugieren que a temperaturas menores de 600° C los gases producidos durante la irradiación de neutrones no tendrán ningún efecto serio sobre las propiedades del berilio.

El descubrimiento de las prometedoras propiedades nucleares del berilio llevó a los científicos norteamericanos en el período 1945–50 a un intenso estudio de su tecnología, sobre cuyos resultados está basada una gran parte de la práctica industrial de hoy. Ha habido desde entonces una disminución en el interés de los norteamericanos en el berilio debido a una tendencia general en el diseño de reactores para la producción de electricidad hacia reactores de agua a presión, operando a temperaturas de 300° C, para lo cual el berilio no tendría adecuada resistencia a la corrosión. Sin embargo, ahora un interés creciente en tipos nuevos de reactor a gas, tales como el llamado compacto (*package*), con los que se intenta disponer de una fuente de energía

adaptable y transportable, así como modelos que funcionan a alta temperatura del reactor refrigerado a gas, están de nuevo dando al berilio importancia en el programa norteamericano de energía nuclear.

El diseño de reactores en Inglaterra ha seguido un camino diferente. Los reactores preferidos para la producción de energía eléctrica tienen moderadores de grafito y están refrigerados a gas, como en Calder Hall y sus sucesores. Puede esperarse que en todos los reactores el berilio sea una vaina excelente para el combustible uranio, ya que es compatible con el dióxido de carbono como refrigerante y con el núcleo de grafito dentro del que se pone el combustible envainado. Se ha mantenido por tanto el interés de los técnicos británicos por el berilio, aunque no se haya utilizado aún el metal, porque las temperaturas de operación son tales que la temperatura en la superficie de la vaina es del orden de 400° a 500° C, y entonces se pueden usar otros materiales más fácilmente obtenibles, como el magnesio. Operando a temperaturas más altas, tal como se propone para un nuevo tipo de reactor experimental conocido como A.G.R. (*Advanced Gas-cooled Reactor*) se espera que la superficie de la vaina de combustible alcance temperaturas del orden de 600° C, con lo que los materiales usados actualmente como vaina no tendrán suficientes resistencia y estabilidad. Deben pues ser sustituidos por materiales más resistentes a las altas temperaturas.

Las temperaturas de trabajo más altas implicarán un cambio en la naturaleza del combustible. Cuando se irradia uranio con neutrones se hincha y cambia de forma. A las temperaturas de trabajo de Calder Hall y de las estaciones nucleares en construcción en Gran Bretaña, esto no es un problema serio, pero bajo condiciones más rigurosas, como las del A.G.R., la dilatación del uranio crearía dificultades mucho más grandes. En el A.G.R. el combustible será óxido de uranio, que posee mucha mayor estabilidad dimensional bajo irradiación. Sin embargo, el cambio propuesto en el combustible lleva consigo problemas nuevos, ya que el óxido de uranio tiene la desventaja de ser mal conductor del calor, de manera que para producir suficiente refrigeración, el diámetro de las varillas de combustible tiene que ser reducido apreciablemente, aumentando así la proporción de vaina a combustible en el núcleo. Por consiguiente en el nuevo diseño una vaina con baja absorción de neutrones es más importante que nunca. Afortunadamente, desde ese punto de vista el berilio es el material señalado; tenemos también en él un material de relativamente alto punto de fusión (1285° C), comparado con 650° C del magnesio, lo que promete buena resistencia a altas temperaturas. De esta forma, dos de los mayores problemas en lo que se refiere a materiales de construcción del A.G.R., pueden quedar resueltos simultáneamente. Por esta razón se ha decidido usar vainas de berilio en el A.G.R., y en consecuencia este metal está siendo empleado por vez primera en la industria en cantidades apreciables.

PROPIEDADES

El berilio es un metal verdadero por sus propiedades eléctricas y térmicas y por el brillo que caracteriza generalmente a los metales. Tiene, al mismo tiempo, otras características que le apartan del comportamiento general de los metales y crean dificultades en su uso industrial.

Una de las más importantes es su comportamiento al deformarse. La maleabilidad que permite a los metales ser trabajados es consecuencia de su simple estructura cristalina junto con la ausencia de enlaces específicos y directos entre dos átomos vecinos. Bajo la acción de una fuerza es posible que los átomos en un mismo plano se muevan en relación a los de un plano paralelo adyacente[1] sin ocasionar la fractura del cristal. La suma de un número suficientemente grande de estos movimientos microscópicos produce un deslizamiento visible. Naturalmente serán necesarias fuerzas distintas para producir desplazamientos de diferentes planos cristalinos. En los metales normalmente maleables el desplazamiento ocurrirá en un tipo de plano después de otro según que la componente de la fuerza aplicada, descompuesta en la dirección apropiada de deslizamiento para cada tipo de plano, exceda de la magnitud crítica para el plano considerado. Cuanto mayor sea el grado de simetría de la red cristalina tanto mayor es el número de planos en los que se puede producir deslizamiento y menor la magnitud de la fuerza crítica para producirlos.

La estructura cristalina del berilio es del tipo hexagonal compacto, pero su relación axial es 1,568, que es demasiado pequeña para una estructura compacta ideal. Así, el berilio no se encuentra entre los metales de mayor grado de

[1] Naturalmente este proceso no lleva consigo el movimiento de planos completos de átomos simultáneamente — un movimiento tal requeriría una fuerza enorme prácticamente imposible de producir — sino que es efectuado por la propagación por todo el cristal de imperfecciones de la red cristalina, denominadas dislocaciones.

simetría. Sin embargo, no existe razón alguna a priori para que un metal con tal constitución cristalina no sea fácilmente deformable, usando por ejemplo el desplazamiento en los planos piramidales $\{10\bar{1}1\}$, como ocurre en el titanio, que con una red cristalina semejante puede ser muy dúctil. El berilio comercial no se deforma de esta manera. En los planos básico (0001) y prismático $\{10\bar{1}0\}$ puede ocurrir desplazamiento en la dirección $\langle 11\bar{2}0\rangle$. Desgraciadamente, la fuerza crítica a temperatura ambiente para producir un deslizamiento en los planos $\{10\bar{1}0\}$ es alta comparada con la necesaria para producir la fractura por foliaje del plano (0001). Así, tienden a producirse grietas antes de que ocurra mucho deslizamiento en el plano $\{10\bar{1}0\}$. Por tanto, en la práctica, la deformación a temperatura ambiente queda reducida al deslizamiento en el plano (0001), y las fuerzas aplicadas en la mayoría de las direcciones del cristal causarán su fractura.

Esta deformación significa que el agregado policristalino que constituye un trozo normal del metal no tendrá suficiente ductilidad para fines industriales, a no ser que se tome cuidado especial para asegurarse de que la estructura granular es tal que permita el máximo aprovechamiento del deslizamiento que pueda ocurrir antes de que tenga lugar la fractura. El problema es pues conseguir un tamaño granular suficientemente pequeño conjuntamente con una orientación apropiada.

Otra característica del berilio comercial, que ha influido considerablemente en el desarrollo de los procesos metalúrgicos, es la compleja relación que existe entre temperatura y ductilidad, cuya forma, indicada en los primeros trabajos sobre el berilio [1], aparece ilustrada en la Fig. 1. Investigaciones recientes nos pueden dar una descripción más detallada; A. B. Brown, F. Morrow y A. J. Martin [2] han demostrado ya que el berilio, tratado convenientemente, puede poseer gran ductilidad a temperaturas alrededor de los 600° C, donde se observa normalmente un mínimo en la curva ductilidad-temperatura. Sin embargo, la producción industrial está todavía prácticamente gobernada por la necesidad de trabajar a una temperatura cuidadosamente controlada, para poder así asegurar una ductilidad suficiente.

Otras propiedades, tanto físicas como químicas, unas ventajosas otras no, diferencian al berilio de los demás metales. Por ejemplo, es excepcionalmente ligero, con una densidad de sólo 1,85 g/cm³; sin duda el más ligero entre los posibles materiales estructurales. Se dan conjuntamente en el berilio

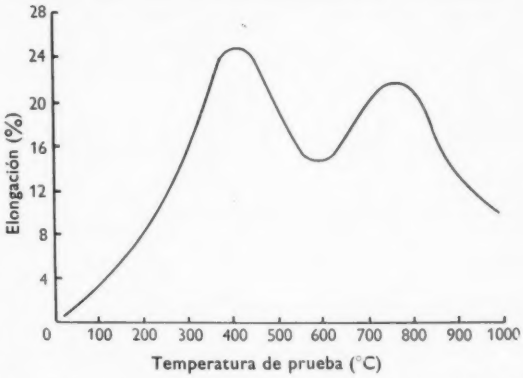


FIGURA 1 – *Efecto de la temperatura en la ductilidad del berilio policristalino.*

ligereza y consistencia, junto con una rigidez que es aún más importante. A temperatura ambiente su máxima fuerza tensora varía entre 30 y 80 kg/mm² y su módulo de elasticidad (3×10^4 kg/mm²) está bastante por encima del de la mayoría de los metales. La conductividad térmica del berilio a temperatura ambiente (0,385 cal/cm² sec °C/cm) es sobrepasada sólo por las del oro, plata, cobre y aluminio. Su calor específico (0,425 cal/g °C) es también alto.

Químicamente el berilio es muy similar al aluminio: muy activo; pero en aire o en atmósferas oxidantes, a temperatura ambiente, se forma una película fina adherente y permanente de óxido inerte que puede proteger al metal contra ciertos tipos de ataque químico, dando una impresión falsa de metal noble. Las características protectoras del óxido de berilio explican asimismo la resistencia al empañamiento u oxidación que se observa en algunas aleaciones que contienen berilio. La plata puede, por ejemplo, hacerse más resistente contra el deslustre mediante la adición de cantidades muy pequeñas de berilio.

El berilio se disuelve rápidamente en ácido sulfúrico y clorhídrico; el índice de ataque en ácido nítrico depende de la concentración de éste: en determinadas condiciones puede llegar a cero comportándose entonces como un metal pasivo. Se puede explicar este fenómeno por la facilidad con que se puede reformar una capa de óxido de berilio bajo condiciones oxidantes. La corrosión producida por disoluciones acuosas neutras varía ampliamente, debido en gran parte a las impurezas del metal o a las del medio corrosivo, que no siempre pueden ser controladas exactamente. Por ejemplo, la presencia de una cantidad pequeña de iones de un metal más noble que el

FIGURA 2 – *Cortando componentes en una vitrina de seguridad. Se usan caretas mientras se dispone el equipo.*

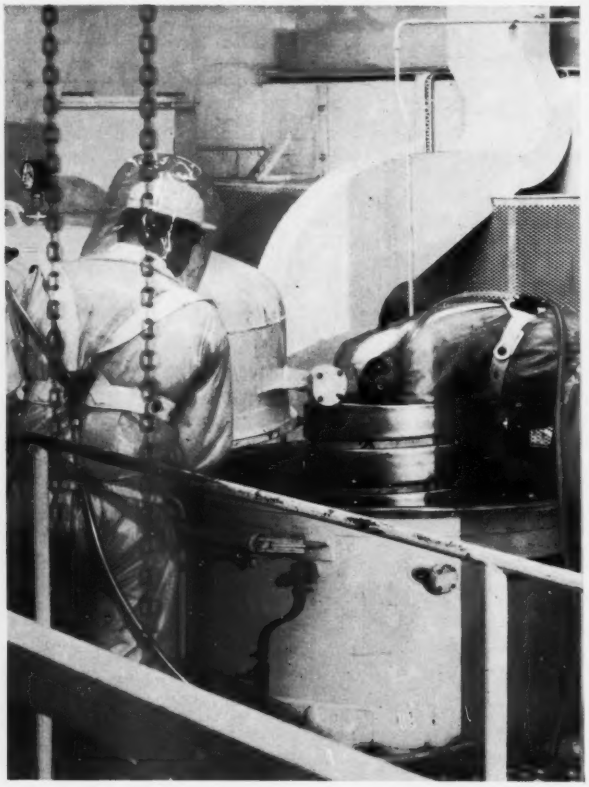


FIGURA 3 – *Trabajadores en un horno de sinterización; llevan vestidos protectores especiales. (Las Figs. 2 y 3 se publican por cortesía de la División de Metales de* Imperial Chemical Industries Limited.)

berilio puede dar lugar a picaduras, como en el caso del aluminio. La calidad del metal disponible hasta ahora para investigaciones no era uniforme y por tanto la interpretación del comportamiento del berilio respecto a la corrosión no es siempre fácil.

En las condiciones previstas para el A.G.R., es decir dióxido de carbono a 600° C, el comportamiento del berilio es satisfactorio mientras el gas esté seco, pero cuando está presente vapor de agua existe el peligro de un aumento repentino del índice de corrosión después de un cierto tiempo. Este fenómeno se conoce con el nombre de «desenganche» (*breakaway*), que indica gráficamente los efectos catastróficos de un cambio en el índice de corrosión.

Por encima de los 700–800° C, el berilio empieza a reaccionar con el aire a velocidad apreciable; de ahí que sea necesaria alguna forma de protección contra la oxidación en trabajos en que el calor entre en juego, no sólo porque sea difícil trabajar con un material que forma una capa gruesa de escamas en su superficie, sino también porque la diseminación de óxido de berilio en la atmósfera es un gran peligro para la salud. El berilio fundido es sumamente activo y ataca a la mayoría de las sustancias con las que entra en contacto. Como recipientes de berilio fundido se emplean crisoles de óxido de berilio.

METALURGIA DEL BERILIO

El berilio se extrae del berilo (silicato de aluminio y berilio) por un procedimiento que consta de cuatro etapas principales:

1. Separación del contenido de berilio de la mena.
2. Conversión a hidróxido de berilio.
3. Producción de un haluro de berilio.
4. Reducción del haluro a metal.

La etapa de separación implica tratamiento con fluoruro o sulfato que produce una sal de berilio soluble en agua, de la que se precipita el hidróxido por medio de un álcali. La naturaleza del haluro en que entonces se convierte el hidróxido depende del proceso de reducción que se vaya a usar. Para reducción con magnesio, método empleado comunmente en los Estados Unidos, el material necesario es el fluoruro de berilio. Para un proceso diferente, desarrollado principalmente en Francia, que implica electrólisis en un baño de sal fundida, se emplea cloruro de berilio. El berilio metálico obtenido por un procedimiento es diferente del obtenido por el otro. El producido mediante reducción con magnesio resulta en un material al que por su apariencia se denomina guijarro; el método electrolítico lo produce en forma de copos o dendritas.

Ninguno de los dos métodos nos da materia prima suficientemente pura para uso directo. Si fuera usado sin purificación posterior, el producto opondría resistencia débil y variable a la corrosion. Es por tanto necesario eliminar las impurezas, en particular los residuos volátiles como el magnesio, el sodio y los haluros, para así asegurar un producto final con resistencia satisfactoria a la corrosión y uniformidad en sus restantes propiedades. Esto se consigue fundiendo el berilio impuro en vacío, corrientemente en un horno de inducción, utilizando un crisol de óxido de berilio. También se ha usado la fusión por medio de un arco eléctrico, aunque en una escala mucho menor. La estructura granular del material obtenido es tal que a la temperatura ambiente su ductilidad es casi cero; las propiedades mecánicas a dicha temperatura, después de refinado el material, no son tan buenas como las que se obtienen cuando el material suministrado como punto de partida es de grano fino. Es pues necesario moler el lingote en polvo fino y consolidarlo de nuevo por medio de una de las formas conocidas para producir metal de grano fino; se obtienen así en un grado óptimo las propiedades del metal. El proceso de pulverización se lleva a cabo en dos etapas, la primera es la conversión del lingote en viruta y la segunda la pulverización de la viruta hasta que pase por un cedazo de 79 kilos por cm. Se emplean alguna vez molinos de bolas, a menudo con carburo de wolframio para reducir la contaminación con hierro, pero cuando la contaminación ha de ser mínima, se muele la viruta entre placas de berilio en un molino de frotamiento.

Los métodos disponibles para consolidar el polvo varían desde el viejo método de comprimir en frío seguido de aglutinación en caliente, hasta la aglutinación en caliente sin presión, que consiste en poner polvo en un molde apropiado que lo consolida sin comprimirlo, calentándolo en vacío hasta una temperatura muy próxima a la de fusión. Sin embargo, se puede lograr una consolidación más eficiente comprimiendo el polvo a altas temperaturas, combinando así las operaciones de compresión y calentamiento; aunque esto supone una gran tensión para las máquinas compresoras y puede acarrear una pérdida de tiempo se ha convertido en el procedimiento más común. La operación se hace en vacío a 1000 ó 1100° C a una presión que puede variar de 3 a 150 kg/cm^2. Son los factores de importancia práctica, tales como una producción económica y el material disponible para moldes, los que determinan la presión usada. Se aplicó presión y calor al berilio por vez primera en los Estados Unidos como una alternativa para moldear las enormes placas necesarias para los reflectores de los primeros reactores cuyo fin era la experimentación de los materiales. Desde entonces el método ha sido perfeccionado de tal manera que ahora pueden fabricarse regularmente piezas de berilio de varios centímetros de espesor y cerca de un metro cuadrado de superficie. También se han fabricado con éxito cilindros de metro y medio de diámetro y de la misma altura, así como otras formas diferentes de un peso por encima de los 1000 kg.

Incluso aunque el berilio sea de grano fino, su ductilidad a temperatura ambiente (3–5% de elongación)es insuficiente para que sea practicable el trabajo en frío. Puede, sin embargo, conseguirse una elaboración más avanzada mediante extrusión, laminado y forja, u otras técnicas normales a temperaturas suficientemente altas para causar el desplazamiento de los planos prismáticos $\{10\bar{1}0\}$. En la práctica, la temperatura de trabajo es de 400° C o más. A 400° C se puede aprovechar la ventaja de tener un máximo en la curva ductilidad/temperatura. Corrientemente la temperatura máxima de trabajo está entre 1000 y 1050° C.

Cuando el berilio efectúa un trabajo mecánico, sus cristales tienden a colocarse de tal forma respecto a la dirección de la fuerza ejercida que ocurre fácilmente desplazamiento en esa dirección. En berilio corriente de forja, producido normalmente por extrusión, se pueden esperar ductilidades por encima de un 30% en la dirección longitudinal. En láminas preparadas especialmente se han obtenido elongaciones de un 50% en la dirección de laminado, pero en direcciones

diferentes a las de laminado la ductilidad es mucho más baja. Cuando la preparación del berilio incluye dos direcciones de trabajo, como ocurre en el laminado cruzado, pueden ocurrir elongaciones de gran magnitud en ambas direcciones pero, de nuevo, la ductilidad en la dirección perpendicular al plano de laminado es muy baja.

TOXICIDAD DEL BERILIO

Uno de los puntos más importantes que debe tenerse en cuenta durante el procesado metalúrgico del berilio es su gran toxicidad, que se manifiesta en dos formas principales; una irritación aguda de la tráquea, que incluye neumonía química, y una enfermedad crónica pulmonar conocida por el nombre de beriliosis. El berilio, como otros muchos metales, puede ser la causa de enfermedades cutáneas — dermatitis y úlceras — particularmente si se introduce en una herida aún abierta, aunque esto, comparado con los efectos pulmonares, es de importancia secundaria. Se han expuesto diferentes puntos de vista sobre la toxicidad relativa de los varios compuestos de berilio, pero desde el punto de vista sanitario, todos deben considerarse peligrosos. Mucho queda por aprender acerca de la beriliosis, pero sabemos que los síntomas de esa enfermedad recuerdan los de una alergía y que relativamente pocas personas son susceptibles a ella. Una característica totalmente desconcertante es que su aparición puede producirse muchos años después de la última vez que el paciente estuvo expuesto al berilio.

No hay peligro al trabajar con el metal o sus compuestos en forma sólida a temperatura ambiente, sino al respirar material dividido muy finamente, que puede ser retenido en los pulmones. Hay pues que mantener un control estricto del contenido de berilio en la atmósfera. Investigaciones realizadas en los Estados Unidos, que fue donde se advirtieron primero de los riesgos del berilio hacia el año 1940, recomiendan niveles de tolerancia (sumamente pequeños) que son aceptados internacionalmente. La concentración en la atmósfera dentro de una fábrica con turnos de trabajo de 8 horas no debe pasar de 2 $\mu g/m^3$. Ningún obrero debe exponerse a una atmósfera con más de 25 $\mu g/m^3$, aunque el turno de trabajo sea de duración corta. En los alrededores de la fábrica el promedio mensual de berilio en la atmósfera debe ser siempre menor de 0,01 $\mu g/m^3$.

Para mantenerse dentro de estos límites de seguridad tan rigurosos, han de tomarse varias precauciones. Las dificultades son mayores por la metalurgia misma del berilio, que incluye como parte esencial la pulverización, y por la fragilidad del metal. La necesidad de trabajar sin lubricante para evitar contaminación produce mucho más polvo finamente dividido, lo que agrava la situación. Para evitar la concentración de polvo de berilio en la atmósfera toda la maquinaria y demás equipo se coloca en cabinas individuales de las que se extrae el aire continuamente (Fig. 2). Cada cabina individual tiene acoplados unos guantes de goma para el manejo desde fuera. Toda persona que trabaje en la fábrica usa ropas especiales y se ducha antes de ponerse su propia ropa. La ropa de trabajo se lava y plancha dentro de la misma fábrica. Cuando se cree que el riesgo puede ser mayor de lo normal y las precauciones corrientes insuficientes, se usan vestidos con aire a presión suministrado desde fuera (Fig. 3).

Todo el aire extraído de la fábrica pasa a través de una columna de filtros «absolutos» de 45 metros antes de dejarlo salir a la atmósfera exterior. Se mantiene el control dentro de la fábrica comprobando constantemente las cantidades de berilio en el aire. Se puede hacer esta operación de varias maneras, que consisten esencialmente en absorber un volumen conocido de aire a través de un papel de filtro y analizar las sustancias depositadas en el papel por medio de una moderna técnica espectrográfica, capaz de detectar cantidades pequeñísimas, del orden de 5×10^{-8} g de berilio. Con el uso de estos métodos tan rigurosos para controlar las condiciones de trabajo, la contaminación de la atmósfera se mantiene siempre por debajo de los niveles especificados de tolerancia y se puede trabajar el metal sin peligro.

INVESTIGACION

El trabajo de investigación tiene como objeto principal dar al metal ductilidad uniforme a temperatura ambiente y mejorar su maleabilidad a altas temperaturas, eliminando el mínimo de la curva ductilidad/temperatura.

Para obtener una ductilidad aceptable a temperatura ambiente la dificultad principal que hay que vencer es la rotura por deslizamiento del plano básico. Las impurezas o las propiedades fundamentales del metal pueden ser las causas del comportamiento observado en el berilio. En caso de que la culpa sea del metal debemos asumir que los enlaces atómicos dentro de los planos en que ocurre la fractura prematura, son mucho más fuertes que los que existen entre esos planos. Es decir el cristal está formado por capas, como el

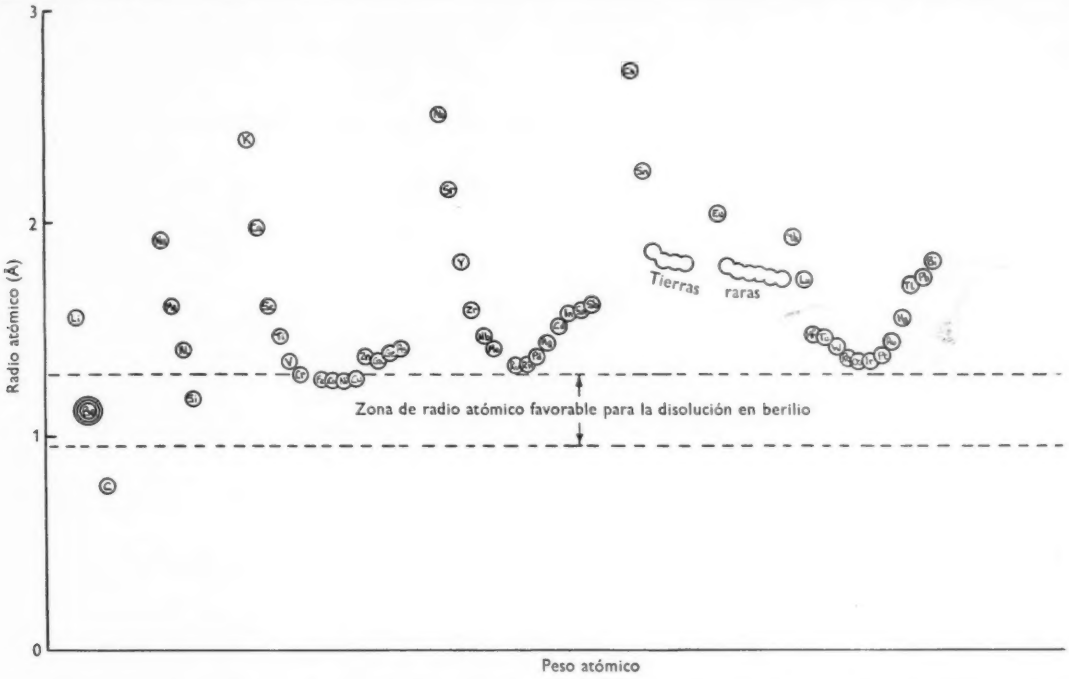


FIGURA 4 – *Radio atómico de los elementos metálicos. Sólo el silicio, hierro, cobalto, níquel y cobre están dentro del límite favorable para su disolución en berilio.*

grafito, que suponen enlaces parcialmente dirigidos, lo que es una diferencia respecto al comportamiento del metal ideal. Si esta explicación fuese cierta, el único modo de mejorar la situación sería alear el berilio con otro metal que pudiera entrar en disolución sólida con él y así, cambiando su estructura electrónica, modificar el tipo de enlace en el cristal metálico e incluso la misma estructura del cristal.

Si, por otro lado, las impurezas representaran un papel importante, elevando por ejemplo la temperatura de transición de dúctil a frágil, que muchos metales sufren a temperaturas bajas, o formando capas de óxido en los bordes granulares, se puede escoger entre eliminar de una vez todas las impurezas o eliminarlas mediante precipitación aprovechando el cambio de solubilidad con la temperatura. Otra alternativa es mezclar el metal con otros elementos que se combinaran preferentemente con las impurezas.

Es difícil imaginar ninguna propiedad fundamental del cristal de berilio que pudiera ocasionar la compleja relación observada entre ductilidad y temperatura, aún suponiendo que la fragilidad del berilio a temperatura ambiente fuera una propiedad inherente suya. Hay por tanto confianza creciente en que sea efecto de las impurezas. De nuevo se puede elegir entre purificación o precipitación de las impurezas mediante calor o por aleación.

La consideración de las propiedades atómicas del berilio sugiere que todo intento de modificar la naturaleza electrónica del metal probablemente no será remunerador. El átomo de berilio, con un radio atómico de 1,25 Å, es muy pequeño. Se ha observado que sólo ocurre buena solubilidad sólida de un metal en otro cuando el radio atómico del soluto no difiere del del solvente en más de un 15%. Debido a que la mayoría de los radios atómicos de los diferentes elementos se encuentran fuera del orden de magnitud favorable (Fig. 4), la solubilidad en el berilio es muy pequeña para la mayoría de los elementos químicos. La tendencia es hacia la formación de compuestos intermetálicos, ya que el berilio es uno de los metales más electropositivos, favoreciéndose así la formación de compuestos con elementos electronegativos. De aquí que parezca muy remota la posibilidad de disolver una cantidad suficiente de un elemento substitucional aleatorio para

modificar apreciablemente las características electrónicas del metal. En realidad sólo las solubilidades del cobre, paladio, níquel, cobalto y plata son apreciables respecto al berilio, e incluso la extensión de su solubilidad sólida es de hecho tan pequeña que no podemos suponer que afecte la naturaleza intrínseca del berilio. Se ha intentado estabilizar a bajas temperaturas la estructura cúbica de cuerpos centrados que parece que el berilio toma a temperaturas cercanas al punto de fusión, añadiendo los materiales aleatorios más prometedores, y, aunque cabía esperar pocas posibilidades de éxito sin una solubilidad sólida mayor que la encontrada hasta ahora, experimentos recientes indican que puede ser posible retener la estructura de alta temperatura a temperaturas cerca de las favorables para el trabajo en caliente.

Cualquier aspecto del comportamiento del berilio que sea debido a impurezas, tiene posibilidades mucho mayores de ser cambiado. Los métodos de purificación que se están investigando actualmente incluyen la destilación, la refinación mediante yoduro, el refinamiento zonal, la electrólisis y la fusión por haz electrónico. No se ha producido todavía por ninguno de estos métodos una forma de berilio que no implique dificultades en su metalurgia, y es posible que sean esas pequeñas cantidades de impurezas lo que causa la fragilidad.

Al tratar de resolver el problema de las impurezas por precipitación en vez de purificación, el hecho de que la solubilidad sólida de la mayoría de los elementos es muy limitada ayuda más que dificulta, puesto que se pueden añadir cantidades pequeñas de elementos aleadores que tengan una gran afinidad por las impurezas comunes, sin modificación apreciable del berilio. La exploración completa de las posibilidades de esa precipitación mediante aleación de aditivos y tratamiento térmico es una parte importante de la investigación actual sobre el berilio. Se ha sugerido que la impureza causante es el hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, hierro, aluminio o silicio, y se espera que los resultados de los trabajos de investigación actuales aclaren más exactamente el papel que representan estos elementos.

Parte del esfuerzo empleado en las investigaciones sobre el berilio se dedica al estudio de los movimientos de las dislocaciones en cristales de berilio, lo que debería aclarar el por qué de la fragilidad del metal a temperatura ambiente y determinar los procesos por medio de los cuales pueden influir las impurezas en su comportamiento deformatorio. El conocimiento de la buena ductilidad del berilio, dada una estructura granular satisfactoria, ha actuado también como incentivo para conseguir la estructura deseada en material preformado.

FUTURO DEL BERILIO

Aunque ha sido necesario el estímulo de la energía atómica para producir el esfuerzo necesario para el desarrollo industrial del berilio, el metal puede muy bien encontrar otras aplicaciones. La más clara está en la construcción de aviones, que se puede beneficiar de su ligereza y rigidez extremas. Esas mismas propiedades pueden crear algunas aplicaciones en los cohetes. Pueden encontrarse usos menos espectaculares en los componentes de un giróscopo, que requieren gran rigidez y estabilidad dimensional. Puede también ser usado en aparatos de rayos X, ya que por ser transparente a éstos, puede ser la ventana ideal. Fue ésta la primera aplicación industrial del berilio metálico.

El berilio es caro por la naturaleza de su metalurgia, pero se espera que la producción en gran escala haga bajar su precio. Hace diez años el precio en Norteamérica del berilio en lámina estaba por encima de $200 por kg, pero una demanda anual de 50 toneladas redujo rápidamente el precio a $100 el kg. Sería prematuro dar indicaciones sobre las tendencias en los precios británicos, pero se supone que no excederán de los que rigen en los Estados Unidos. Al hacer comparaciones de precios debe tenerse en cuenta que el berilio es bastante más ligero que otros metales y que las cifras empleadas en comparaciones deberían expresar el precio por unidad de volumen; así resulta el berilio en una posición más favorable.

Un conocimiento más profundo del comportamiento del metal y de su toxicidad son ahora necesarios para así simplificar y abaratar el proceso industrial. Con los adelantos de la metalurgia y de la medicina podemos esperar que dentro de pocos años sea posible estimar el futuro del berilio mucho más exactamente.

REFERENCIAS

[1] Kaufmann, A. R., Gordon, P. y Lillie, D. W. *Trans. Amer. Soc. Metals*, **42**, 786, 1950.

[2] Brown, A. B., Morrow, F. y Martin, A. J. *Nature, Lond.*, **187**, 494, 1960.

El transporte de sustancias orgánicas en las plantas

A. L. KURSANOV

Aunque ya se ha establecido desde hace mucho tiempo que el floema (líber) y el xilema (tejido leñoso) son los medios por los que se transportan las sustancias orgánicas en las plantas, son todavía oscuros los mecanismos utilizados. En este artículo el autor presenta una revisión general del conocimiento actual y de su interpretación teórica, con referencia especial a las investigaciones recientes en Rusia. Concluye con una discusión interesante sobre el intercambio de productos entre hojas maduras.

Hoy subsiste todavía la vieja teoría de que, en las plantas, las sustancias son transportadas en las células del xilema y floema, pero aún existen muchos problemas que surgen cuando se estudia la naturaleza de los movimientos y especialmente de la savia descendente. Durante el último decenio se han establecido muchos datos importantes mediante los trazadores radiactivos, pero todavía existen dos teorías diferentes y opuestas. Según la primera, propuesta por E. Münch en 1932 [1], una disolución que circule en las células perforadas transporta pasivamente hacia abajo las sustancias asimiladas; la fuerza motriz está ocasionada por la diferencia de la presión de turgencia entre los dos extremos del sistema [2, 3]. Según la segunda teoría no existe una corriente masiva de la disolución, sino un movimiento activado de moléculas. Se supone que la energía requerida procede del metabolismo de las células perforadas o de sus compañeras. Ninguna de estas teorías posee todavía pruebas decisivas en su favor.

La hipótesis de circulación en masa encuentra algunas dificultades. Las observaciones citológicas no muestran normalmente canales conductores (*Plasmodesmata*) a través de los cuales pudiera tener lugar, de una célula a otra, una corriente continua de disolución. Más aún, si existen tales canales, deben ser tan estrechos que la resistencia a la circulación sería mucho mayor que la que se puede reconciliar con las velocidades indicadas por estudios con isótopos. Otro punto difícil es que las sustancias pueden moverse simultáneamente con velocidades diferentes [4, 5, 6] e incluso en direcciones opuestas [7].

Por estas razones vamos a considerar la hipótesis del transporte activado; pero todavía no está claro cómo se utiliza la energía del metabolismo. Se necesita un estudio más detallado del metabolismo del floema. Los estudios llevados a cabo por M. N. Zaprometov en 1949 [8, 9] mostraron que los aminoácidos se desplazaron en una disolución a través de los extremos cortados de tallos de trigo hacia las espigas en cantidades de 50 a 100 veces mayores que las que se podían explicar por transporte en la corriente de transpiración. Esta observación sugiere que el transporte de sustancias orgánicas podría depender de un metabolismo.

M. V. Turkina [10], utilizando ^{14}C, mostró en 1954 que la principal sustancia transportada en las fibras conductoras de la remolacha azucarera es sucrosa; un resultado similar ha sido notado [11] para la soja (*Glycine soja*). Los resultados indicaron además que la raíz de la remolacha azucarera no puede sintetizar sucrosa por sí misma [12, 13] sino que la recibe ya elaborada de las hojas.

El predominio de la sucrosa como una sustancia de transporte ha sido demostrado después en otras muchas especies. Es evidente en especial en los experimentos realizados por M. K. Chailakhyan y yo [14] con injertos recíprocos de girasol (*Helianthus annuus*) y girasol tuberoso (*Helianthus tuberosus*) dispuestos como en la Fig. 1. El girasol tuberoso forma grandes cantidades de fructosanas, desde la más simple hasta el tipo de altos polímeros, mientras que el girasol ordinario se caracteriza por la formación de almidón y monosacáridos. Cuando una hoja del componente superpuesto del injerto fue alimentada con $^{14}CO_2$ se hizo evidente que los carbohidratos sintetizados se desplazaban a las raíces sin que dependiese de si se habían formado primero en hojas de girasol tuberoso o del corriente, ni de qué componente de la planta mixta habían atravesado. La alta proporción de ^{14}C hallado en la sucrosa cuando se analizó la última de las diversas secciones aparece también indicada en la Fig. 1. El papel de la sucrosa como material

de transporte ha sido también indicado claramente [15]. Cuando la glucosa marcada con ^{14}C es absorbida por la escama córnea del trigo o cebada, se convierte rápidamente en sucrosa y sólo entonces es enviada a los brotes y raíces. En algunas especies la sucrosa aparece reemplazada por galactósidos análogos o parcialmente por rafinosa [16, 17]. Esto no contradice el papel central de la sucrosa y quizá lo extiende, ya que muestra que los residuos de galactosa pueden ser transportados cuando se agregan a la sucrosa.

Además de los azúcares se mueven en el floema aminoácidos, ácidos orgánicos y probablemente otras muchas sustancias. Se ha hecho un estudio detallado de los ácidos orgánicos y aminoácidos en la corriente de descenso. Por ejemplo, M. I. Brovchenko [5] ha demostrado que cuando una hoja de ruibarbo (*Rheum* sp.) se cubre parcialmente con una cámara conteniendo $^{14}CO_2$, en un período de 3–4 minutos se encuentran en las venas adyacentes no sólo azúcares marcados sino también ácidos orgánicos y aminoácidos marcados con ^{14}C (Fig. 2). En general se encontró que los aminoácidos son más móviles que los ácidos orgánicos, pero el detalle más significativo es que los asimilados penetraron en los tejidos conductores en proporción diferente de los de las células fotosintetizadoras. En el ruibarbo los ácidos más móviles son el málico y el cítrico, y entre los aminoácidos, la treonina, serina y alanina. Otros, por ejemplo los ácidos succínico y fumárico, o no penetraron en las fibras conductoras o lo hicieron muy lentamente (Fig. 3). La composición de la disolución descendiente puede variar con el estado de crecimiento de la planta. Al principio del otoño, la velocidad de movimiento de la prolina y del ácido aspártico disminuye mientras que la de la treonina y serina permanece elevada y la del ácido γ-aminobutírico incluso aumenta. Las plantas de soja mostraron resultados semejantes (C. D. Nelson y P. R. Gorham [6]); se colocó una gota de disolución que contenía aminoácidos radiactivos sobre un tallo de hoja del que se había cortado el limbo. Los diversos aminoácidos fueron

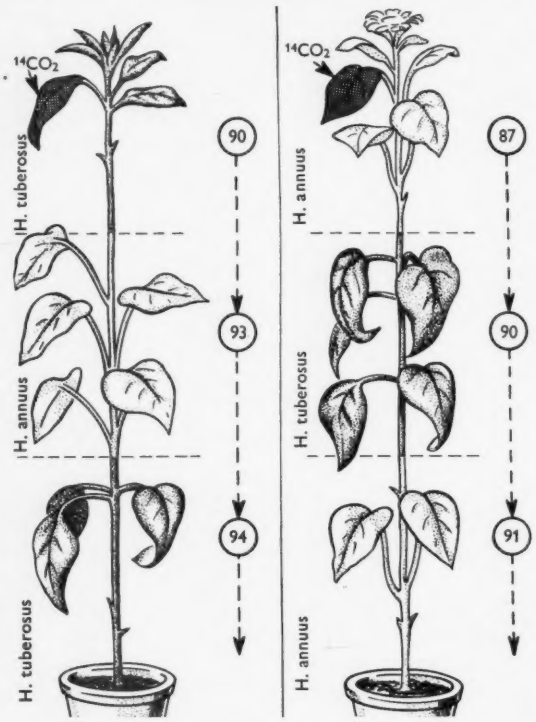


FIGURA 1 – *Injertos de girasol y girasol tuberoso alimentados con $^{14}CO_2$ solamente a través de las hojas en negro. Las cifras en círculos muestran los porcentajes del ^{14}C total en cada zona recobrado como sucrosa.*

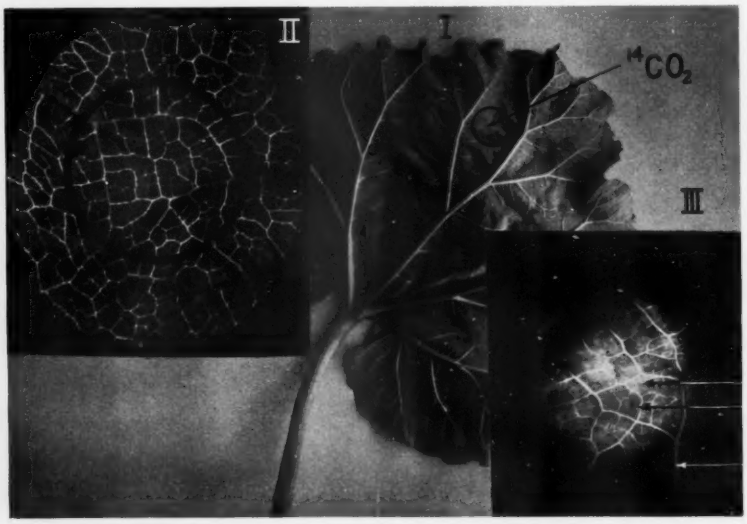


FIGURA 2 – *Envés de hoja de ruibarbo. En* I, *el círculo oscuro muestra el área que se alimentó con $^{14}CO_2$;* II *es una parte de la misma ampliada, mostrando las venas más pequeñas.* III *es una radio-autografía que muestra, después de pocos minutos, la distribución del ^{14}C en el mesófilo* (a), *venas* (d), *y venas fuera del área de suministro* (b).

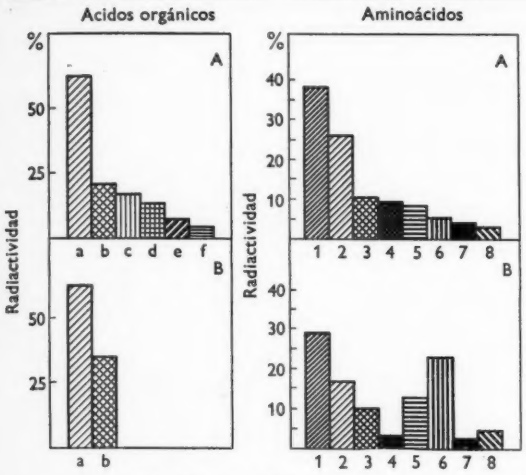


FIGURA 3 – *Distribución de ^{14}C en hoja de ruibarbo después de alimentar con $^{14}CO_2$ un área restringida. A, ^{14}C recobrado del mesófilo; B, ^{14}C recobrado de las venas (fibras conductoras). Los siguientes ácidos orgánicos fueron examinados:* (a) *málico,* (b) *cítrico,* (c) *succínico,* (d) *fumárico,* (e) *tartárico y* (f) *oxálico. Los aminoácidos* (1) *serina,* (2) *alanina,* (3) *glicina,* (4) *aspártico,* (5) *glutámico,* (6) *treonina,* (7) *γ-aminobutírico y* (8) *prolina también fueron examinados.*

transportados dentro de la planta con velocidades diferentes e incluso en direcciones diferentes. En plantas de 17 días, la serina, que se acumula rápidamente en tejidos jóvenes, era muy móvil mientras que la asparagina y glutamina apenas se movieron. En plantas más viejas estas relaciones quedaron invertidas. La velocidad de movimiento de los productos fotosintéticos marcados con ^{14}C ha demostrado ser inesperadamente rápida. Varía en las diferentes hierbas de 40 a 120 cm/hora [18, 19]. Estas velocidades son muy superiores a las que podían esperarse de una simple difusión.

Nelson y Gorham han observado velocidades todavía mayores en aminoácidos transportados a través de plantas de soja de 20 a 24 días a velocidades de 370 a 1370 cm/h y algunas veces incluso a 3000 cm/h. Su técnica está, sin embargo, sujeta al peligro de que algunas de las gotitas aplicadas al extremo cortado del tallo, pueden ser absorbidas en los vasos abiertos del xilema. Experimentos posteriores [20] en los que se alimentaron las hojas de soja con $^{14}CO_2$, mostraron que una parte pequeña de los asimilados que contenían ^{14}C se movieron hacia las raíces a una velocidad mayor de 5000 cm/h, y que esto fue seguido por la masa principal de asimilados a unos 100 cm/hora. Puede pues concluirse que existen dos mecanismos separados para el transporte de sustancias orgánicas en el floema. Incluso velocidades de 100 cm/h crean dificultades para la teoría de desplazamiento masivo, debido a la gran finura de los canales que conectan las células de floema y las grandes diferencias de presión osmótica que se necesitarían. Estos experimentos representan incluso una dificultad seria para la teoría metabólica, ya que requerirían un gasto considerable de energía.

Turkina [21] ha hecho contribuciones importantes desde este punto de vista, mostrando que los tejidos conductores de la remolacha azucarera, *Plantago* sp. y *Caragana arborescens* tienen intensidades respiratorias elevadas. Estos y resultados semejantes están resumidos en la Tabla I. Ziegler [24] fue capaz de dividir los haces de *Heracleum* en xilema y floema, y mostró que la respiración es rápida en ambos tejidos.

Turkina y Dubinina [25] demostraron que el cociente respiratorio (CO_2/O_2) de los haces fibrovasculares es próximo a la unidad; esto es, que su respiración tiene lugar principalmente a costa de los hidratos de carbono. En los tejidos conductores la citocromoxidasa predomina sobre

TABLA I

Medida de la respiración en haces fibrovasculares y otros tejidos

Plantas	Respiración (µl de O_2 por gramo de tejido fresco)			Autores
	Haces fibro-vasculares	Hojas	Peciolos (sin haces)	
Remolacha azucarera	572	416	100	Kursanov y Turkina, 1952
Remolacha azucarera	462	232	95	Tsao-Tsung-Hsun y Liu-Chin-Yu [22]
Plantago major	820	374,8	228	Kursanov y Turkina, 1952
Plantago major	500	—	146	Willenbrink, [23]
Primula beesiana	309	—	52	Willenbrink, [23]
Heracleum mantegazzianum	230	—	32	Ziegler, 1958

las otras oxidasas, indicación de la naturaleza de las etapas terminales de su respiración.

Los análisis del jugo del floema de *Robinia pseudacacia* realizados por H. Wanner [26] se citan con frecuencia como prueba de la inactividad de las células tubulares cribosas, las cuales es también sabido que no tienen núcleo después de una cierta edad. Sin embargo, sería inexacto identificar las actividades enzimáticas de un floema exudado de una corteza lesionada, con el aparato enzimático del mismo protoplasma. Más aún, los tubos cribosos están en relación estrecha con sus células compañeras y parecen formar un sistema metabólico único.

Ya poseemos un conocimiento detallado de las enzimas de los haces vasculares de la remolacha azucarera (Tabla II). En ella vemos que los haces pueden activar las hexosas por el camino de la reacción de hexoquinasa. La presencia de aldolasa y deshidrogenasa succínica activas indica que es probable que la respiración tenga lugar por glicolisis y el ciclo de Krebs. La invertasa, por el contrario, está casi ausente y esto explica la relativa estabilidad de la sucrosa en las fibras conductoras.

Sin embargo, parte del azúcar en movimiento en el floema se transforma. O. A. Pavlinova [27] demostró que la fructosa marcada con ^{14}C que circula a través de las fibras conductoras de la remolacha azucarera se convierte más bien rápidamente en partes iguales de fructosa y glucosa también «marcadas». No se observó glucosa «marcada», indicando una isomerización rápida de hexosas y la utilización de sus ésteres fosfóricos

TABLA II

Enzimas de glicolisis y oxidación en tejidos conductores (remolacha azucarera)

Enzimas	Actividad	Autores
Aldolasa	+ + +	Pavlinova
Apirasa	+ +	Pavlinova
Citocromoxidasa	+ + + +	Turkina y Dubinina
Fosfatasa (ácido)	+ +	Turkina y Dubinina
Fosforilasa	+	Turkina y Dubinina
α-Galactosidasa	+	Pavlinova
Hexoquinasa	+ + +	Pavlinova
Fosfohexosa isomerasa ..	+	Pavlinova
Invertasa	+	Turkina y Dubinina
Deshidrogenasa succínica ..	+ +	Ziegler

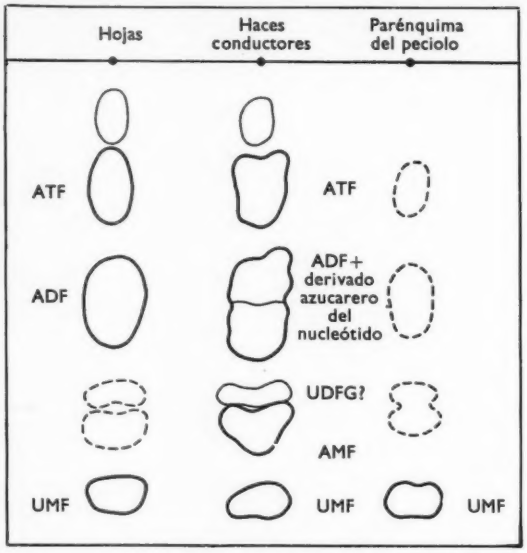


FIGURA 4 – *Los nucleótidos solubles en ácidos en los tejidos conductores de remolacha azucarera: AMF adenosina monofosfato, ADF adenosina difosfato, ATF adenosina trifosfato, UMF uridina monofosfato, UDFG uridina difosfato glucosa.*

para la síntesis de sucrosa. Esta conclusión se confirmó por la presencia de cantidades considerables de mono y difosfato de uridina en los haces vasculares. Turkina [28], usando haces aislados, demostró que la sucrosa marcada, utilizada en la respiración, se convierte en los tejidos conductores en una mezcla de ácidos que comprenden el pirúvico, hidroxipirúvico, β-cetoglutárico, oxalacético y glioxílico. Estos cetoácidos conducen, por aminación y transaminación, a series de aminoácidos que fueron también identificados.

Las principales transformaciones de sucrosa ocurren por tanto por glicolisis y siguiendo el ciclo de Krebs, originándose muchos productos intermedios y secundarios. El consumo de sucrosa en estas reacciones es probablemente escaso, comparado con la cantidad total que pasa a través de las fibras conductoras en el mismo tiempo. Sin embargo, la respiración intensa de los tejidos conductores permite deducir que se forman con tal motivo bastantes enlaces inestables del fosfato (ATF); tal doctrina recibe apoyo indirectamente en la alta actividad de la hexoquinasa y la abundancia relativa de nucleótidos y otros compuestos órgano-fosfóricos.

La Fig. 4 muestra los cromatogramas de nucleótidos obtenidos de los haces fibrovasculares de la

remolacha azucarera. También se muestran cromatogramas similares del limbo de las hojas y del parénquima de los peciolos de las mismas plantas. La comparación muestra que los haces son más ricos en nucleótidos que el parénquima que les rodea o que el limbo.

Ahora podemos dar una idea detallada del metabolismo de los tejidos conductores, pero todavía existe la duda si la energía liberada pone en movimiento el mecanismo de transporte. La contestación, aparentemente, debería ser afirmativa, aunque no se sabe todavía cómo se utiliza esa energía. Se ha visto que el transporte de sustancias orgánicas es retardado considerablemente, o incluso detenido, cuando los haces fibrovasculares son envenenados con inhibidores respiratorios, tales como el monóxido carbónico, cianuro, dinitrofenol, arsenito, azida e iodacetato. Un resultado similar se obtiene por enfriamiento local a 2–5° C de los tejidos conductores, como demostró Curtis en 1919. Todo esto sugiere que el metabolismo activo de los tejidos conductores es un requisito previo para el transporte normal de las sustancias orgánicas a través de ellos. La misma conclusión alcanzaron Nelson y Gorham [6, 29], quienes demostraron que el transporte de sucrosa y ciertos aminoácidos es inhibido por el cianuro o por altas temperaturas: mientras que el movimiento de sucrosa y arginina, por ejemplo, cesó completamente en floema dañado, en el que continuó el de monosacaráridos y asparagina.

Los principales compuestos del transporte, especialmente la sucrosa, no son absorbidos en los vasos porque el protoplasma de las células circundantes posee una mayor afinidad por ellos, y de esa forma los retiene. Nuevos experimentos realizados por Turkina [30] apoyan esta teoría, ya que mostró que los haces fibrovasculares aislados de las hojas de la remolacha azucarera y otras plantas tienen una capacidad para acumular sucrosa muy superior a la de otros tejidos. La glucosa y la glicina son menos absorbidas por las fibras conductoras; la absorción selectiva de sucrosa se puede obtener colocando los tejidos conductores en soluciones-mezcla (Tabla III). Tanto el floema como el xilema de las fibras conductoras poseen esta capacidad. La acumulación de la sucrosa es fuertemente inhibida por el cianuro y el dinitrofenol (Tabla IV). Todavía se conoce muy poco sobre la «afinidad» de los tejidos conductores por otras sustancias, tales como algunos aminoácidos; pero parece ya plausible que la diferencia de afinidad es una de las razones del paso selectivo de la sucrosa y ciertos aminoácidos de las células fotosintetizantes a los canales circulatorios. También se puede explicar por qué los haces fibrovasculares permanecen ricos en sucrosa en toda su longitud mientras los tejidos que los rodean contienen principalmente monosacáridos.

El transporte de sustancias orgánicas a grandes distancias depende no sólo del metabolismo de las fibras conductoras, sino de las actividades de los órganos en los dos extremos. Las sustancias asimiladas en las células del mesófilo son transferidas al sistema conductor muy rápidamente y de ordinario con independencia del gradiente de la concentración [29, 31]. Debe descartarse toda idea de que esta rapidez es debida únicamente a la difusión y debe buscarse la explicación en términos de una secreción glandular o de una acumulación selectiva a costa de la energía metabólica de los mismos tejidos conductores. El trabajo mencionado de Turkina sugiere una función activa de los mismos tejidos conductores pero no excluye la otra posibilidad.

TABLA III

Absorción comparativa de sucrosa-^{14}C, glucosa-^{14}C y glicina-1-^{14}C por los haces conductores de remolacha azucarera, septiembre 1959. (En pulsos por minuto por gramo de peso en fresco)

Sustancia	Actividad específica de 1 ml de solución	Absorción (1 hora)		Razón *a/b*
		(*a*) haces conductores	(*b*) parénquima de los peciolos	
Sucrosa	103 330	20 610	2880	7,2
Glucosa	109 800	7450	3980	1,8
Glicina	108 870	4820	2940	1,6

TABLA IV

Influencia de los venenos respiratorios sobre la absorción de sucrosa por los haces conductores de la remolacha azucarera

Duración del experimento	Solución	Absorción (P.p.m./g)	Porcentaje de inhibición
1 hora	Sucrosa	25 222	64,0
	Sucrosa + KCN (10^{-3} M)	9073	
2 horas	Sucrosa	52 937	51,2
	Sucrosa + DNF (10^{-4} M)	25 860	

TABLA V

Influencia de ATF en el flujo de asimilados (^{14}C) del mesófilo en los haces conductores en la remolacha azucarera (p.p.m./g)

	Junio		Septiembre	
	H_2O	ATF	H_2O	ATF
Mesófilo	224 490	200 040	94 760	112 540
Haces conductores (cm)				
3–4	2470	3110	300	3450
5–6	1300	2170	230	1160
7–8	720	1130	110	740
9–10	350	870	80	280
11–12	340	530	—	—
13–14	180	320	—	—
Total que penetra en los haces ..	5360	8130	720	5630

El mecanismo de entrada de los productos de fotosíntesis en el sistema conductor no ha sido todavía estudiado suficientemente pero parece que el metabolismo activo es una condición esencial. Por analogía con la absorción de nutrientes a través de las paredes del intestino, el paso de azúcares de las células fotosintetizadoras a los tejidos conductores se atribuye con frecuencia a la fosforilización. Sin embargo, como existe apenas prueba de esto quisiera señalar varios experimentos recientes llevados a cabo por Brovchenko en nuestros laboratorios. Este encontró que enriqueciendo las hojas de remolacha azucarera con adenosintrifosfato (ATF) se produce una aceleración apreciable en la liberación de asimilados formados después de proveer $^{14}CO_2$ durante cinco minutos dentro de las fibras conductoras así como un movimiento más rápido hacia la raíz (Tabla v). Las observaciones se hicieron en la oscuridad durante un período de 25 minutos, esto es en condiciones que impiden la formación fotosintética de ATF.

Los movimientos de sustancias orgánicas a través de la planta son aparentemente muy complicados; la composición y dirección de flujo varían considerablemente por una serie de razones. En 1953 N. A. Pristupa obtuvo radiografías de plantas de calabaza de 22 días que mostraban que la mayoría de los asimilados marcados con ^{14}C en las hojas se habían movido a la raíz. En experimentos posteriores [19] se encontró que un 50% había llegado a las raíces y parte había vuelto a los órganos de la superficie en la corriente de transpiración después de cambiar de forma. Así surgió la idea de un ciclo de materia orgánica en las plantas.

El movimiento preferencial de asimilados hacia las raíces ha sido corroborado por otros muchos investigadores, trabajando en plantas anuales hasta la época de su floración; al envejecer la planta cambia la distribución de asimilados. Esto ha sido demostrado muy claramente por I. F. Belikov [32] con plantas de soja en la proximidad de Vladivostok. Utilizando $^{14}CO_2$ encontró que las hojas de plantas maduras suministran sus asimilados a ciertos órganos o zonas. Las hojas de un nivel bajo envían sus productos principalmente a las raíces, pero al desarrollarse el fruto, un número creciente de hojas pasa sus asimilados a éste, y al final incluso las de niveles bajos lo

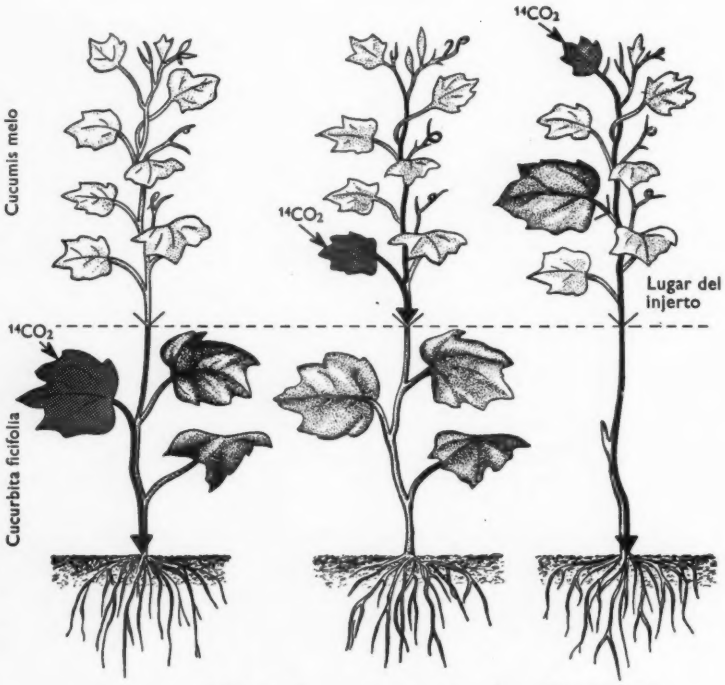


FIGURA 5 – *Injerto de* Cucumis melo *sobre* Cucurbita ficifolia.

hacen así y cesan casi por completo de alimentar las raíces. En esta etapa la planta no reacciona a fertilizante adicional, puesto que sus raíces no pueden formar suficientes aceptadores de iones.

Las hojas jóvenes, que no han completado su crecimiento, son capaces de fotosintetizar, pero no suministran fotosintetizados a otras partes de la planta. Al contrario, continúan durante un período largo recibiendo productos de fotosíntesis de las hojas maduras más cercanas. El intercambio de productos entre hojas maduras a niveles diferentes cesa virtualmente y no es posible provocar un flujo de asimilados a una hoja madura, incluso mediante oscurecimiento prolongado. Esta regla severa — la ausencia de ayuda mutua entre hojas maduras — puede ser de importancia biológica considerable, pues releva a la planta de la necesidad de alimentar hojas que están en una posición desfavorable para la fotosíntesis.

Estudios recientes con plantas de tabaco [33] muestran también que los asimilados que contienen ^{14}C y provienen de hojas maduras continúan entrando en hojas jóvenes durante un período considerable. Al final de su período de crecimiento, una hoja absorbe y «exporta» asimilados simultáneamente; en su estado maduro la exportación resulta predominante. En esta etapa, el flujo de asimilados a las hojas jóvenes va probablemente a través del xilema, en el que penetra desde el floema una parte de los asimilados. Esto parece explicar por qué asimilados «marcados» pueden encontrarse sólo en hojas por encima de la alimentada con $^{14}CO_2$ y no en hojas inferiores, incluso aunque la mayoría de los productos fotosintéticos se había desplazado a las raíces.

La distribución de asimilados en plantas es probablemente mucho más compleja que lo sugerido por estos experimentos. H. C. M. De Stigter [34] ha demostrado que es posible injertar melón (*Cucumis melo*) en *Cucurbita ficifolia* sólo si se dejan unas pocas hojas en el tallo, puesto que las hojas del vástago injertado no alimentan las raíces ajenas. Es suficiente injertar una única hoja de la especie madre en la parte superior del vástago para que todas las hojas de éste empiecen a enviar asimilados al tallo (Fig. 5).

Parece que el movimiento de sustancias orgánicas en plantas está regulado de muchas maneras por medio del metabolismo de todas las partes de la planta, y creo que las células conductoras del floema no son una excepción. Creemos que se debe prestar más atención al problema de la relación del metabolismo con el transporte de sustancias orgánicas y es precisamente tal aspecto de estos estudios el que intentamos desarrollar en nuestro laboratorio.

REFERENCIAS

[1] MÜNCH, E. «Die Stoffbewegungen in der Pflanze». Jena. 1932.
[2] MITTLER, T. E. *Nature, Lond.*, **172**, 207, 1953.
[3] MOTHES, K. y ENGELBRECHT, L. *Proc. All-Union Bot. Congr.*, Leningrado. 1957.
[4] BIDDULF, O. y CORY, R. *Plant Physiol.*, **32**, 609, 1957.
[5] KURSANOV, A. L., BROVCHENKO, M. I. y PARIISKAYA, A. Физиол. Растении, **6**, 527, 1959.
[6] NELSON, C. D. y GORHAM, P. R. *Canad. J. Bot.*, **37**, 431, 1959.
[7] CHEN, S. L. *Amer. J. Bot.*, **38**, 203, 1951.
[8] KURSANOV, A. L. y ZAPROMETOV, M. N. Докл. Акад. Наук, C.C.C.P., **68**, 1113, 1949.
[9] *Idem. Ibid.*, **69**, 89, 1949.
[10] KURSANOV, A. L. y TURKINA, M. V. *Ibid.*, **95**, 885, 1954.
[11] VERNON, L. P. y ARONOFF, S. *Arch. Biochem. Biophys.*, **36**, 383, 1952.
[12] KURSANOV, A. L. y PAVLINOVA, O. A. Биохимия, **17**, 446, 1952.
[13] PAVLINOVA, O. A. *Ibid.*, **19**, 364, 1954.
[14] KURSANOV, A. L., CHAILAKHYAN, M. K., PAVLINOVA, O. A., TURKINA, M. V. y BROVCHENKO, M. I. Физиол. Растении, **5**, 3, 1958.
[15] EDELMAN, J., SHIBKO, S. I. y KEYS, A. J. *J. exp. Bot.*, **10**, 178, 1959.
[16] ZIMMERMAN, M. H. *Plant Physiol.*, **33**, 213, 1958.
[17] PRISTUPA, P. A. Физиол. Растении, **6**, 30, 1949.
[18] KURSANOV, A. L., TURKINA, M. V. y DUBININA, I. Докл. Акад. Наук, C.C.C.P., **93**, 1115, 1953.
[19] KURSANOV, A. L. y PRISTUPA, N. A. Физиол. Растении, **4**, 417, 1957.
[20] NELSON, C. D., PERKINS, H. J. y GORHAM, P. R. *Canad. J. Bot.*, **37**, 1181, 1959.
[21] KURSANOV, A. L. y TURKINA, M. V. Докл. Акад. Наук, C.C.C.P., **84**, 1073, 1952.
[22] TSAO TSUNG HSUN y LIU CHIN YU. *Acta Bot. Sin.*, **6**, 2699, 1957.
[23] WILLENBRINK, J. *Planta*, **48**, 3, 1957.
[24] ZIEGLER, H. *Ibid.*, **51**, 186, 1958.
[25] TURKINA, M. V. y DUBININA, I. Докл. Акад. Наук, C.C.C.P., **95**, 199, 1954.
[26] WANNER, H. *Ber. schweiz. bot. Ges.*, **63**, 201, 1953.
[27] PAVLINOVA, O. A. Физиол. Растении, **2**, 378, 1955.
[28] TURKINA, M. V. *Ibid.*, **6**, 709, 1959.
[29] NELSON, C. D. y GORHAM, P. R. *Canad. J. Bot.*, **35**, 703, 1957.
[30] TURKINA, M. V. Биохимия, **19**, 357, 1954.
[31] ZIEGLER, H. *Planta*, **47**, 447, 1956.
[32] BELIKOV, I. F. Физиол. Растении, **2**, 354, 1955.
[33] JONES, H., MARTIN, R., y PORK, H. K. *Ann. Bot. Lond.*, N.S., **23**, 493, 1959.
[34] DE STIGTER, H. C. M. *Proc. IX Inter. Bot. Congr.*, **2**, 90, 1959.

Polarografía

G. C. BARKER y G. W. C. MILNER

La difusión cerca de un electrodo estacionario es un proceso mal definido que proporciona datos poco seguros acerca de la composición de la solución mediante el estudio de las variaciones de intensidad que se producen al variar el potencial de los electrodos. Estas y otras dificultades se evitan utilizando un electrodo de gota de mercurio, en cuyo empleo se basa la polarografía, método analítico extraordinariamente rápido y aplicable a concentraciones muy reducidas de sustancias oxidables o reducibles.

En general, cuando existe una diferencia de potencial entre dos electrodos metálicos estacionarios sumergidos en una solución que contiene sustancias oxidables o reducibles, tienen lugar en ellos reacciones en que el cátodo cede electrones a iones o moléculas en la solución y el ánodo los acepta, al tiempo que pasa una corriente eléctrica por la célula. La intensidad de esta corriente depende de la composición de la solución y del potencial aplicado; el estudio de la relación entre el potencial y la intensidad permite obtener datos acerca de la composición de la solución. En el caso de una célula ordinaria, estos datos son sólo cualitativos, ya que, debido a la acumulación de los productos de la electrólisis en los electrodos o en sus inmediaciones y a que la corriente pueda ser afectada por las corrientes de convección en el seno de la solución, las curvas intensidad/potencial no son reproducibles. Estas dificultades se evitan en polarografía — técnica descrita originariamente por J. Heyrovsky en 1922 — utilizando el electrodo de gota de mercurio y un electrolito de soporte. En estas condiciones, al aumentar la diferencia de potencial entre los electrodos, la intensidad varía a saltos. Una solución que contenga varias sustancias oxidables o reducibles da una curva intensidad/potencial cuya forma permite identificar las distintas especies presentes y determinar su concentración en la solución.

TECNICA

El electrodo de gota de mercurio consiste en un tubo capilar de vidrio ($\simeq$0,05 mm de diámetro) unido a un depósito de mercurio por medio de un tubo flexible. Las gotas de mercurio salen regularmente del extremo del capilar a un ritmo de una gota cada 3–6 segundos. Normalmente, este electrodo constituye el cátodo de la célula polarográfica; el ánodo está formado por la masa de mercurio del fondo (Fig. 1). El electrodo de gota de mercurio tiene la ventaja de que evita la contaminación de la superficie del electrodo por los productos de la reacción, puesto que la superficie se renueva continuamente. Además, permite utilizar el método polarográfico en solución ácida, ya que la reducción del ion hidrógeno en una superficie de mercurio tiene lugar con gran dificultad.

Para ilustrar el fundamento de este método, supóngase que los electrodos están sumergidos en una solución que contiene unos miligramos de cloruro de cadmio por litro. Los iones cadmio en contacto con el cátodo se reducen a metal cuando el potencial de aquél es aproximadamente 1,0 voltios más bajo que el del ánodo. El cadmio metálico se disuelve en el mercurio formando una amalgama que se elimina al caer la gota de mercurio. Al reducirse los iones cadmio en el cátodo, le ceden sus electrones, pasa corriente entre los dos electrodos y se forma una cantidad equivalente de cloruro mercurioso en el ánodo de mercurio del fondo. La eliminación de iones cadmio de la solución en las inmediaciones de la gota de mercurio determina la creación en dicha región de un gradiente radial de concentración, con lo que los iones cadmio tienden a difundirse hacia el cátodo. En un momento dado, el flujo radial de iones cadmio en la superficie de la gota de mercurio depende del gradiente de concentración, pero en una solución diluida puede también estar influido por la electromigración originada por los gradientes de potencial en el seno de la solución. En polarografía, la electromigración es un inconveniente y se evita añadiendo a la solución una cantidad relativamente grande de una sal indiferente que se conoce con el nombre de electrolito de soporte. De esta forma, la corriente que se observa en el cátodo se debe exclusivamente al proceso de difusión.

Si el potencial fijo se sustituye por un potencial negativo que aumente lentamente, no hay paso de corriente a través de la célula, mientras el potencial

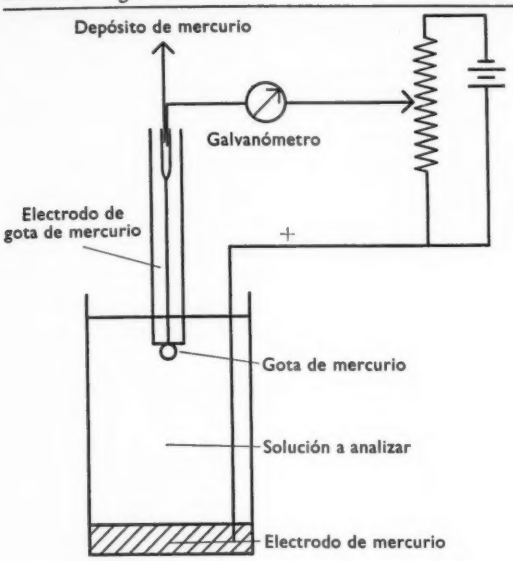


FIGURA 1 – *Célula polarográfica (esquemática).*

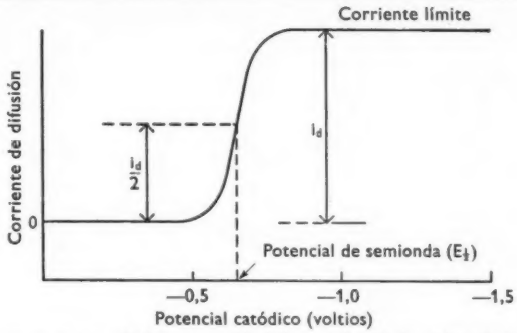


FIGURA 2 – *Polarograma ideal de una solución de sal de cadmio.*

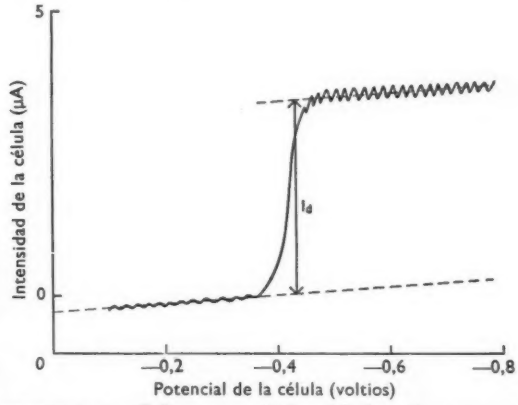


FIGURA 3 – *Polarograma típico del ion plomo en una solución de cloruro potásico.*

permanezca inferior al de reducción de los iones cadmio. Pero al alcanzarse este potencial, empieza la reducción, y la concentración de iones cadmio en la solución en contacto con la superficie del electrodo disminuye rápidamente hasta un valor despreciable. Como la intensidad es directamente proporcional al número de iones cadmio que llegan a la superficie del electrodo por unidad de tiempo, que a su vez es proporcional al gradiente de concentración, la intensidad se eleva rápidamente hasta un valor que ya no varía en forma apreciable con nuevos aumentos del potencial aplicado (Fig. 2). El valor límite de la intensidad (i_d) se designa generalmente con el nombre de corriente límite de difusión y, con tal de que el proceso de reducción esté controlado por la difusión, es proporcional a la concentración de la especie reducible en la masa de la solución; este hecho constituye la base de las aplicaciones de la polarografía al análisis cuantitativo. La corriente límite varía ligeramente durante la vida de la gota de mercurio, debido al crecimiento de ésta y, normalmente, se mide su valor medio. Este depende de factores como el coeficiente de difusión de la especie reducible, la velocidad a que fluye el mercurio y la «edad de la gota»; la dependencia entre la intensidad y estos factores es bien conocida [1, 2]. En la práctica, estos factores se mantienen constantes y las concentraciones se determinan añadiendo cantidades conocidas de la especie en cuestión a la solución y estudiando el efecto de estas adiciones sobre la corriente límite de difusión.

La curva intensidad/potencial producida por una reacción electródica se denomina onda polarográfica (Fig. 2) y el potencial del electrodo de gota de mercurio (referido a un electrodo de referencia apropiado) correspondiente al punto de la onda en que la intensidad de la corriente de difusión es igual a la mitad del valor límite se denomina potencial de semionda ($E_{\frac{1}{2}}$). Para un electrolito de soporte dado, este potencial es característico del ion que se reduce e independiente de la concentración del ion. Los valores del potencial de semionda tienen por consiguiente gran interés en el análisis polarográfico cualitativo.

OBTENCION E INTERPRETACION DE POLAROGRAMAS

El instrumental básico para la obtención de las curvas que relacionan la intensidad con el potencial es simple y consiste en un potenciómetro para aplicar el potencial de polarización a los electrodos y un galvanómetro o un microamperímetro sensible para medir la intensidad. El circuito básico puede verse en la Fig. 1. Para trabajo

experimental continuado son preferibles instrumentos automáticos; el potenciómetro es movido por un motor y la intensidad se registra fotográficamente o por medio de un registrador de estilete. En la Fig. 3 puede verse una curva intensidad/potencial típica obtenida con dicho instrumento; el polarograma corresponde a una solución conteniendo 1 mg de una sal de plomo en 10 ml de cloruro potásico 0,1N. Puede verse que ya antes de alcanzarse el potencial de reducción del plomo pasa una corriente muy baja, la corriente residual. Esta corriente se debe a la doble capa iónica que existe en la interfase entre el electrodo de gota de mercurio y la solución. Es imposible eliminar esta corriente de fondo y debe aplicarse una corrección gráfica como se indica en la Fig. 3. El polarograma muestra también las pequeñas variaciones de intensidad causadas por el crecimiento y caída de las gotas de mercurio.

EL ELECTROLITO DE SOPORTE

La elección del electrolito de soporte depende de varios factores, el más importante de los cuales es el potencial de reducción de su catión. Este potencial ha de ser apreciablemente más negativo que el potencial de semionda de los iones a determinar. Las sales de potasio, sodio y amónicas se utilizan con frecuencia en la determinación de metales menos nobles; las sales de tetrametilamonio se pueden utilizar en la determinación de sodio y potasio. El anión del electrolito de soporte tiene también importancia, ya que el método polarográfico no es completamente satisfactorio para el estudio de reducciones cuyo potencial de semionda está próximo o es más positivo que el potencial a que tiene lugar la disolución anódica del electrodo de mercurio.

Cuando se han de determinar dos o más iones en la misma solución, debe escogerse el electrolito de soporte con gran cuidado, a fin de que los valores de $E_{\frac{1}{2}}$ para las distintas ondas difieran por lo menos en 150 milivoltios, pues de otra forma, las ondas tienden a confundirse y es imposible determinar con precisión sus alturas individuales.

En muchos casos, la corriente de difusión no aumenta gradualmente hasta el valor límite como se indica en las Figs. 2 y 3, sino que presenta un pico acusado al comienzo de la parte horizontal de la curva. La presencia de este máximo en la onda polarográfica dificulta la medición de la altura de la onda, pero, en general, se puede suprimir añadiendo una pequeña cantidad de una sustancia tensoactiva a la solución.

CORRIENTES CINETICA Y CATALITICA

Hasta aquí solamente se han considerado corrientes de difusión debidas a reducciones electroquímicas sencillas. No obstante, en ciertos casos, el polarograma se modifica debido a un proceso puramente químico que precede o sigue a la reacción electroquímica, como ocurre, por ejemplo, en la reducción de ciertas aldosas y ácidos orgánicos. En las aldosas, la reducción electroquímica va precedida de la transformación tautomérica de la forma cíclica en una cadena abierta y la corriente de difusión está controlada por la transformación química. Análogamente, en la reducción de ciertos ácidos orgánicos, como el pirúvico, sólo la forma no disociada se reduce con facilidad y la corriente viene determinada por la velocidad de un proceso químico.

Ciertas reacciones originan las denominadas corrientes catalíticas. Un buen ejemplo es la debida al peróxido de hidrógeno, catalizada por el hierro. La reducción de los iones férricos en el electrodo de gota de mercurio origina iones ferrosos. Si hay peróxido de hidrógeno presente en la solución, los iones ferrosos son reoxidados químicamente a iones férricos cuando todavía están cerca del electrodo de gota de mercurio y quedan en disposición de ser reducidos nuevamente en el electrodo. La corriente adicional originada por la presencia del peróxido de hidrógeno se denomina corriente catalítica. El estudio de esta corriente ha permitido determinar un valor para la constante de la velocidad de reacción que concuerda bien con los valores obtenidos por otros métodos. Otro tipo de corriente catalítica es la debida a las proteínas en solución amoniacal. En este caso, la corriente se debe a la evolución de hidrógeno, que es un proceso catalizado por las proteínas en solución.

APLICACIONES DE LA POLAROGRAFIA ORDINARIA

Aunque esta técnica puede tener muchos campos de aplicación, se emplea principalmente en análisis químico. Los límites de concentración para su aplicación a las determinaciones analíticas se encuentran comprendidos entre 10^{-2} y 10^{-5} M; la corriente residual impide aplicarla a concentraciones inferiores. Las concentraciones en el intervalo 10^{-2} a 10^{-4} M se pueden determinar con una precisión de $\pm 2\%$. El método polarográfico es especialmente adecuado para el análisis de elementos presentes en cantidad infinitesimal, pues proporciona una precisión y reproducibilidad aceptables. Además, en muchos casos las

determinaciones se pueden hacer en una fracción del tiempo necesario con métodos químicos, puesto que muchas veces se puede evitar el prolongado tratamiento previo de la muestra. El factor humano desempeña un papel menos importante en polarografía que en la mayoría de los métodos analíticos, especialmente si los polarogramas se registran automáticamente. En tal caso, el polarograma es interpretado en forma idéntica por operadores distintos y los resultados se pueden comprobar en cualquier momento, puesto que queda un registro permanente.

ANALISIS METALURGICO E INORGANICO

Las aplicaciones de la polarografía en análisis metalúrgico son muy extensas; se utiliza para la determinación de trazas de Cu, Pb, Sn, Cd, Ni, Zn y otros elementos en un gran número de aleaciones férreas y no férreas. En la mayoría de los casos sólo se necesita disolver la muestra en un ácido mineral, pero algunas veces es preciso eliminar la interferencia de un componente fácilmente reducible y más abundante. Los métodos más sencillos para eliminar interferencias consisten en cambiar la valencia del elemento que la causa o en añadir reactivos para formar compuesto complejo con el mismo. La formación de un compuesto complejo desplaza la onda polarográfica hacia potenciales más negativos; el valor de este método puede apreciarse en la determinación del plomo y del níquel en las aleaciones de cobre. Estas aleaciones se disuelven con facilidad en ácido clorhídrico, pero en el polarograma de la solución aparece una onda grande debida a la reducción de los iones cúpricos antes que las correspondientes a las reducciones de los iones plomo y níquel. No obstante, la determinación del contenido de plomo y níquel se puede llevar a cabo polarográficamente con facilidad si se alcaliniza la solución de la muestra y se añade cianuro para formar compuestos complejos con los iones cobre y zinc.

Las aplicaciones de la polarografía en análisis son muy numerosas, comprendiendo la determinación de varios constituyentes inorgánicos en minerales, rocas, aguas, productos químicos orgánicos e inorgánicos, pigmentos, propelentes, colorantes en comestibles y materiales biológicos como plantas y suelos [1, 2].

La aplicación del método polarográfico no se limita a los iones que pueden oxidarse o reducirse en el electrodo de gota de mercurio. Entre los elementos cuyos iones no se pueden reducir ni oxidar se cuentan el torio, el zirconio, el hafnio y el tántalo, pero se han encontrado métodos indirectos para la determinación de dos de estos elementos: el torio y el zirconio se pueden precipitar con ácido *m*-nitrobenzóico y después de filtrar y redisolver el precipitado con un ácido mineral, el metal se determina indirectamente por la onda polarográfica de los grupos nitro del precipitado.

ANALISIS ORGANICO

Las aplicaciones de la polarografía en análisis orgánico no son tan numerosas como en análisis inorgánico. Hay muchas sustancias orgánicas que pueden ser reducidas en el electrodo de gota de mercurio, pero la mayoría de estas reducciones son procesos irreversibles que dan ondas polarográficas que se aproximan a su altura máxima con gran lentitud. La altura de tales ondas es más difícil de determinar que la de las que se obtienen en polarografía inorgánica. Además, como los iones hidrógeno participan en la reducción de muchas sustancias orgánicas, es preciso utilizar soluciones con la concentración de iones hidrógeno cuidadosamente regulada. Otro hecho que hay que tener en cuenta es la escasa solubilidad de muchas sustancias orgánicas en agua, lo que hace que el análisis tenga que llevarse a veces a cabo en mezclas de disolventes orgánicos y agua o en soluciones no acuosas. Las mezclas de alcohol y agua son, en general, satisfactorias; entre los disolventes no acuosos, se han empleado el glicol, el dioxano, la piridina y el alcohol. En general, los compuestos orgánicos que se reducen en el electrodo de gota de mercurio contienen grupos reducibles o enlaces dobles conjugados; por ejemplo, los aldehidos, las cetonas, los nitroderivados alifáticos y aromáticos, los azoderivados, las vitaminas, los esteroides, los derivados sulfurados y los compuestos organometálicos dan ondas que pueden utilizarse [1, 2].

ANALISIS DE GASES

El oxígeno se reduce en el electrodo de gota de mercurio dando dos ondas de la misma altura. La primera es adecuada para la determinación del oxígeno en varias sustancias, incluyendo líquidos, gases y sólidos. La determinación continua del oxígeno disuelto en las aguas se puede llevar a cabo con un electrodo de gota de mercurio de tubo ancho. La polarografía puede también aplicarse a la determinación del oxígeno contenido en el plasma sanguíneo y para estudiar la respiración y fotosíntesis en las células vivas.

APLICACION A LAS VALORACIONES

El electrodo de gota de mercurio puede

FIGURA 4 – *Curva de valoración de una solución de nitrato de plomo con solución de dicromato potásico.*

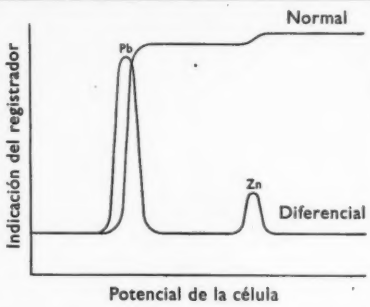


FIGURA 5 – *Polarogramas normal y diferencial (ideales) de una solución de iones zinc y plomo.*

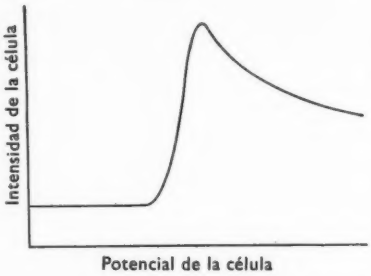


FIGURA 6 – *Curva intensidad/potencial en un polarograma oscilográfico.*

emplearse para indicar el punto final de una valoración química. Un ejemplo típico es la valoración de plomo con dicromato. La corriente de difusión producida al aplicar una diferencia de potencial de 1,0 V disminuye al ir añadiendo la solución de dicromato, hasta alcanzarse el punto final; a partir de este momento, vuelve a elevarse. La posición del punto final viene dada por la intersección de las dos rectas que unen los puntos experimentales (Fig. 4). Esta técnica puede emplearse también cuando la sustancia a valorar es reducible y el reactivo no, o viceversa. Debido a la solubilidad del precipitado, la discontinuidad de la curva intensidad/volumen no siempre es abrupta, pero en general esto no crea dificultades para fijar el punto final. Aunque esta técnica se emplea principalmente para reacciones de precipitación, se utiliza también para algunas valoraciones basadas en la formación de iones complejos.

POLAROGRAFIA DIFERENCIAL

Durante los últimos diez años se ha intentado aumentar el poder resolvente de la polarografía registrando la velocidad con que varía la intensidad que pasa por la célula al aumentar el potencial aplicado. Estos «polarogramas diferenciales» presentan un máximo para el potencial de semionda. El método es especialmente conveniente para la determinación de un ion en presencia de una gran concentración de otro ion más fácilmente reducible (Fig. 5).

Los polarogramas diferenciales se obtienen sumergiendo dos electrodos de gota de mercurio sincronizados en la solución de la muestra. El circuito de polarización está dispuesto de tal manera que entre estos dos electrodos hay una diferencia de potencial pequeña y constante; el circuito de corriente se modifica de forma que lo que se registra es la diferencia entre las corrientes de difusión de los dos electrodos. Se han descrito diversas variaciones de este método [3, 4]; sin embargo, en el procedimiento corrientemente adoptado se emplea una célula polarográfica normal, evitándose así las dificultades que origina el empleo de electrodos sincronizados [5, 6]. Fundamentalmente, este segundo método sólo requiere la introducción de un circuito diferenciador en una de las conexiones eléctricas de la célula polarográfica.

POLAROGRAFIA CON CORRIENTE ALTERNA

Con los métodos citados no se puede mejorar la sensibilidad del polarógrafo ordinario y, en años recientes, se han desarrollado nuevos tipos de polarógrafo para satisfacer la necesidad de una mayor sensibilidad combinada con una resolución más elevada. Los polarogramas diferenciales que se obtienen con estos instrumentos, resultan del componente alterno de la intensidad que se obtiene al sobreponer un pequeño potencial alterno al potencial ordinario que se aplica a los electrodos de la célula polarográfica. Los instrumentos más sencillos utilizan un pequeño potencial sinusoidal, con lo cual, el componente periódico de la intensidad es la suma de dos intensidades sinusoidales, una relacionada con la doble capa iónica en la superficie del electrodo de gota de mercurio y otra que se debe a las variaciones de las corrientes de difusión producidas por los pequeños y rápidos cambios en el potencial de la célula. La diferencia entre las fases de estas dos corrientes se puede utilizar para obtener un polarograma que muestra principalmente la variación del componente alterno de la corriente de difusión con el potencial medio de la célula. Este polarograma tiene la misma forma general que los polarogramas diferenciales obtenidos por métodos más sencillos, pero los iones reducibles pueden

ser detectados a concentraciones mucho más bajas.

Se puede obtener una sensibilidad aún mayor si se emplea un potencial de onda cuadrada en vez de un potencial sinusoidal, ya que con el primero es más fácil separar el componente periódico de la corriente de difusión de la corriente mucho más intensa que se origina en la doble capa iónica. Con un polarógrafo de onda cuadrada se pueden detectar iones reducibles cuando su concentración es sólo 4×10^{-8} M; la sensibilidad es grande incluso en presencia de concentraciones elevadas de iones que interfieren con el funcionamiento del polarógrafo ordinario [7]. Por ejemplo, se pueden determinar polarográficamente las trazas de elementos de un acero en una solución muestra que contenga cantidades elevadísimas de ion férrico fácilmente reducible. El polarógrafo de onda cuadrada ha encontrado aplicaciones muy importantes en el análisis de sustancias como aleaciones, aguas naturales, aguas residuales industriales, alimentos, abonos y minerales [8].

El polarógrafo de pulsos es otro instrumento electrónico capaz de gran sensibilidad y precisión que ha sido desarrollado recientemente [9]. Este instrumento aplica pequeños pulsos rectangulares (duración de 0,04 sec) a los electrodos de la célula polarográfica. Los pulsos, que se aplican en un momento prefijado de la vida de la gota de mercurio, se sobreponen a un potencial que varía lentamente como en la polarografía ordinaria. Los cambios producidos por los pulsos en la corriente de difusión se miden con la ayuda de circuitos electrónicos. Este instrumento es mucho más sensible que el polarógrafo de onda cuadrada, especialmente para la determinación de sustancias que se reducen irreversiblemente, como el oxígeno, el peróxido de hidrógeno y muchos compuestos orgánicos. Sus aplicaciones en análisis inorgánico y orgánico son muy numerosas.

POLAROGRAFIA OSCILOGRAFICA

Otro desarrollo importante es un polarógrafo que proyecta un polarograma de forma poco corriente en la pantalla de un oscilógrafo [10]. El potencial que este polarógrafo aplica a los electrodos de la célula, varía rápidamente; la variación empieza hacia el final de la vida de la gota de mercurio. De esta manera se puede explorar la totalidad o sólo parte del intervalo útil de la variación del potencial del electrodo de gota de mercurio en el tiempo que dura una sola gota y el polarograma se proyecta casi continuamente en la pantalla del oscilógrafo. Con este instrumento, la corriente de difusión producida por una reducción sencilla se eleva rápidamente a un máximo para un potencial próximo al potencial normal de semionda y disminuye después lentamente al hacerse más negativo el potencial del cátodo (Fig. 6).

La polarografía oscilográfica permite llevar a cabo las determinaciones con gran rapidez y con precisión parecida a la obtenida con la polarografía ordinaria. El poder resolvente es elevado y las interferencias debidas a una especie fácilmente reducible y más abundante pueden evitarse haciendo que el potencial del electrodo de gota de mercurio antes de aplicar el potencial de barrido sea un poco más negativo que el potencial de semionda para la reducción del ion que interfiere. En circunstancias apropiadas, los iones reducibles se pueden determinar a concentraciones de hasta 5×10^{-7} M. El polarógrafo oscilográfico de barrido único, se utiliza para análisis de rutina en muchos laboratorios.

Para mejorar su funcionamiento, muchos instrumentos modernos hacen amplio uso de circuitos electrónicos, pero de momento son menos seguros que los polarógrafos ordinarios. Cuando se remedie este defecto, como puede que ocurra cuando se utilicen los avances recientes en el campo de los semiconductores, estos instrumentos estarán llamados a desarrollar un papel muy importante en la expansión de la polarografía como método analítico.

REFERENCIAS

[1] Milner, G. W. C. «The Principles and Applications of Polarography». Longmans, Green & Co., Londres. 1957.

[2] Kolthoff, I. M. y Lingane, J. J. «Polarography» (2ª edición). Interscience Publishers, Nueva York. 1952.

[3] Heyrovsky, J. *Analyt. chim. Acta*, **2**, 537, 1948.

[4] Airey, L. y Smales, A. A. *Analyst*, **75**, 287, 1950.

[5] Vogel, J. y Riha, J. *J. Chim. phys.*, **47**, 5, 1950.

[6] Leveque, M. P. y Roth, F. *Ibid.*, **46**, 480, 1949.

[7] Barker, G. C. *Analyt. chim. Acta*, **18**, 118, 1958.

[8] Milner, G. W. C. *Proc. Congr. Mod. Analyt. Chem.*, St. Andrews, 1957.

[9] Barker, G. C. y Gardner, A. W. A.E.R.E. Rep. C/R 2297, 1958.

[10] Davis, H. M. y Seaborn, J. E. *Electron. Engng*, **25**, 314, 1953.

El crecimiento y la calcificación de los corales

T. GOREAU

Los corales son animales emparentados con las anémonas de mar. Difieren de ellas por su facultad de producir esqueletos calcáreos macizos que pueden llegan a formar grandes y tupidas colonias. En este artículo se exponen recientes investigaciones sobre el proceso de formación de dichas colonias, más especialmente las de corales de arrecife. Estas investigaciones se basan en el uso de isótopos radiactivos.

Los corales de arrecife constituyen las mayores colonias de organismos marinos de nuestro planeta en la actualidad. Algunas de ellas han debido existir sin interrupción durante más de 50 millones de años. La sedimentación secular de sus esqueletos calcáreos da lugar a los llamados arrecifes coralinos, algunos de los cuales alcanzan 300 metros de espesor. Así, en los mares tropicales, los corales desempeñan un importante papel como constructores de arrecifes, formando a menudo nuevas islas y llegando a alterar de modo sorprendente las costas. Su estudio tiene además el interés de que la calcificación de corales es un proceso que debe seguir ocurriendo igual que en remotas épocas de la historia del globo.

El estudio biológico de los corales se inició a comienzos del siglo XIX con las investigaciones taxonómicas de Lamarck y Milne-Edwards, entre otros. Los rasgos fundamentales de la anatomía, histología y embriología de los corales quedaron aclarados en las primeras décadas de nuestro siglo; hoy esos aspectos se siguen investigando con el nuevo recurso de la microscopía electrónica y la citología química. A fin de siglo, Agassiz inició su magno estudio sobre el crecimiento y ecología de los corales de arrecife. Otros autores emprendieron después estudios similares en escala mundial [1], aclarándose así la posible relación entre los arrecifes y ciertos cambios de nivel en mares y continentes, sobre todo los ocurridos durante el Pleistoceno. Recientemente los ecólogos han puesto de manifiesto la extraordinaria capacidad de los arrecifes coralinos para mantener muy alta producción de materia orgánica en un medio carente, como son las aguas superficiales de los mares tropicales.

El estudio experimental de los corales de arrecife data de no más de 50 años. Buen impulso dieron los estudios sobre fisiología de la nutrición y crecimiento verificados por miembros de la *British Great Barrier Reef Expedition* de 1928–29. Fueron también importantes las contribuciones a la fisiología y bioquímica de los corales aportadas por biólogos japoneses en las Palau con anterioridad a la segunda guerra mundial. Quedan, no obstante, muy notables problemas por resolver.

Los verdaderos corales de arrecife viven hoy exclusivamente en aguas limpias, cálidas y soleadas de los mares tropicales, destacando los enormes arrecifes de los llamados mares coralinos en el Oceano Indo-Pacífico y en el Atlántico occidental. En la mayoría de los arrecifes el pólipo constituye la unidad estructural, pero, a menudo, la edificación coralina se ve activada por la presencia de algas calcáreas que contribuyen a cementar y consolidar la trama coralígena hasta convertirla en una masa caliza compacta.

Los Madreporarios o Escleractinias, llamados corales pétreos, forman un orden de animales dentro de la subclase Hexacoralarios, clase Antozoos y tipo Celentéreos [2]. Se caracterizan ante todo por segregar un esqueleto calcáreo macizo, que sirve de soporte al pólipo vivo (Fig. 1). Aunque cada pólipo individual no suele pasar de los diez milímetros de diámetro, la citada masa esquelética llega a alcanzar a menudo grandes dimensiones debido al aumento de la colonia por reproducción asexual de los pólipos adultos. En muchos arrecifes abundan colonias coralinas individualizadas que pesan varios cientos de toneladas y colmarían sobradamente una habitación espaciosa. Los parientes más próximos de los verdaderos corales son las anémonas de mar, quizá conocidos de toda persona que haya visitado las costas. Corales y anémonas coinciden en tener una misma estructura básica corporal y cierto aire común; aquéllos difieren, no obstante, por su disco basal, tenue como una gasa y muy

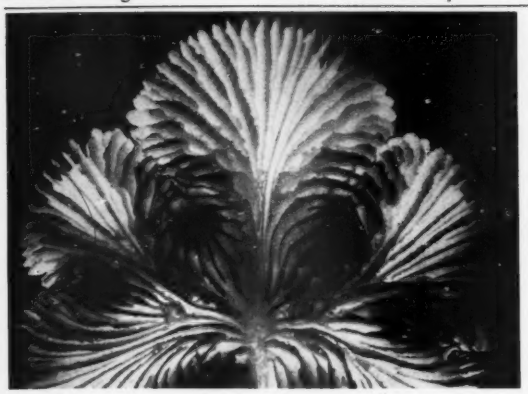


FIGURA 1 – *Esqueleto de* Colpophyllia natans, *coral constructor de arrecifes. Se exhibe una colonia joven desposeída de su revestimiento carnoso. Las crestas radiales son calcáreas.*

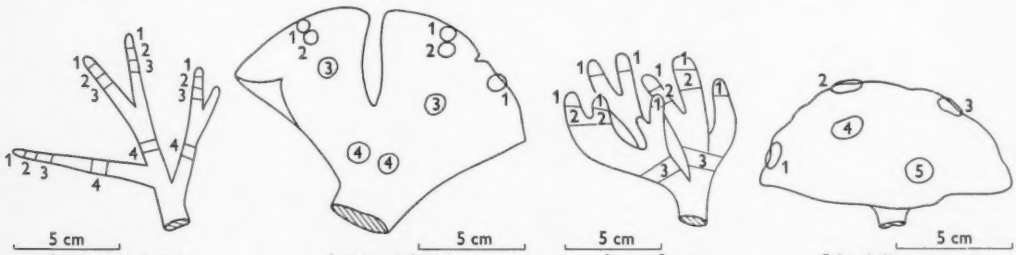
replegado a fin de proporcionar la máxima superficie para la secreción calcárea.

Términos como «crecimiento» y «esqueletogénesis» se refieren aquí a la calcificación de los corales. «Pólipo» y «coralite» se usan como vocablos equivalentes para designar cada individuo animal que forma parte de la colonia coralina. La palabra «coral» resulta equívoca en boca del vulgo, quien designa con ella cualquier formación calcárea o córnea ramificada de origen marino. En este artículo «coral» se refiere exclusivamente a Madreporarios o Escleractinias, pero no, por ejemplo, a las gorgonas ni al coral noble, que pertenecen al grupo de los Octocoralarios, ni tampoco a los Estilastéridos, que son hidrozoos calcáreos. En los corales, el esqueleto calizo se denomina *corallum* o esclerenquima, y las partes carnosas se designan conjuntamente como *polyparium* o cenenquima. Los especialistas distinguen claramente entre corales ahermatípicos, de aguas profundas, no recifales, y corales hermatípicos de aguas someras, constructores de arrecifes.

Nota singular y común a todos los corales de arrecife es su asociación simbiótica con algas unicelulares llamadas zooxantelas (Fig. 8). Los corales tropicales de aguas someras contienen gran cantidad de dichas algas en el epitelio que reviste la cavidad celentérica, dentro de ciertas células gastrodérmicas especializadas como portadoras. Las zooxantelas son Dinofíceas, grupo que incluye también muchas algas marinas planctónicas.

TECNICAS

El estudio de los corales tropieza con un grave obstáculo: la dificultad de mantener corales vivos y sanos en acuarios de laboratorio por tiempo suficiente para poder medir con precisión su crecimiento. Tal experimento requiere semanas y hasta meses. Deseosos de encontrar un método más rápido, iniciamos hace cuatro años el desarrollo de técnicas a base de isótopos trazadores utilizando el ^{45}Ca radiactivo. Los corales no discriminan entre calcio estable y calcio radiactivo; ambos isótopos son depositados en el esqueleto en las mismas proporciones que existan en el medio. Por ello, es posible tomar los aumentos de radiactividad en diversas condiciones experimentales como índices de crecimiento o actividad fisiológica [3]. Esta técnica es tan sensible que es posible medir crecimientos en corales expuestos al ^{45}Ca por sólo unas pocas horas, y, además, puede ser aplicada en pleno arrecife [4]. Como bastan



Acropora cervicornis	*Acropora palmata*	*Porites furcata*	*Colpophyllia natans*
Coral « asta de ciervo »	Coral « asta de alce »	Coral digitado	Coral « cerebroide »
1 71,5	1 50,0	1 20,0	1 9,0
2 49,0	2 30,0	2 4,0	2 8,0
3 30,0	3 15,0	3 2,0	3 10,0
4 15,0	4 8,0		4 9,0
			5 10,0

FIGURA 2 – *Gradientes de crecimiento axial en tres especies de corales ramificados, comparados con el de una cuarta especie de coral macizo. Bajo cada figura las cifras de la columna de la derecha dan velocidades de crecimiento medio en cada uno de los sitios señalados en el coral con los mismos números de la columna de la izquierda. Las velocidades se expresan en μg de Ca/mg de N/hora.*

FIGURA 3 – Meandrina braziliensis, *coral de vida libre. Se exhibe una joven colonia en actitud nutricia, completamente extendida, con los numerosos tentáculos provistos de baterías de nematocistos que pueden apreciarse a modo de motitas blancas.*

FIGURA 4 – Tubastrea tenuilamellosa, *tipo de coral no recifal. A diferencia de las otras especies aquí exhibidas, ésta carece de zooxantelas.*

FIGURA 5 – Oculina diffusa, *pequeño coral de tipo ramificado. Su color se debe a las zooxantelas. Los pólipos tienen unos 5 milímetros de diámetro.*

FIGURA 6 – *Fotografía submarina que muestra la cara lateral de la basamenta de un coral a 6 metros de profundidad. Los grandes cuerpos redondeados del centro de la fotografía son corales de arrecife del grupo de las Escleractinias. En el ángulo superior derecho se ven formas aplanadas que son colonias de Millepora, mal llamado coral venenoso, ejemplo de Hidrozoo recifal.*

FIGURA 7 – *Vista aérea de un arrecife de franja cerca de Ocho Ríos, Jamaica, que permite apreciar una clara zonación. El arrecife queda separado de la costa por una laguna somera de color azul claro. La distancia a través del centro de la fotografía es de unos 700 metros.*

pequeñas muestras para efectuar análisis, cabe también medir los diferentes crecimientos que se dan en distintas partes de una determinada colonia, e incluso dentro de un solo pólipo. Y, aunque restan aún cuestiones fundamentales por aclarar, la nueva técnica sirve para describir ciertos factores que controlan o influyen en la reacción calcificante.

FACTORES QUE REGULAN EL CRECIMIENTO DE LOS CORALES

Los más importantes son: la especie de coral, la situación de la colonia, su edad, y ciertas enzimas.

Aunque los corales de arrecife prosperan en medios uniformes por su temperatura, circulación de agua e iluminación, lo cierto es que hemos encontrado repetidamente muy notables diferencias de crecimiento en diferentes especies. El más rápido crecimiento se observa siempre en corales acropóridos ramificados (ej. «asta de alce» y «asta de ciervo»), siguiendo las mileporas (Hidrocoralarios) en segundo lugar, y los Porítidos o corales digitados, en tercero. Los corales de tipo macizo son generalmente más lentos [4].

La situación ocupada por la colonia influye en la velocidad de crecimiento de los corales ramificados, pero no de los macizos. En los primeros hemos comprobado que la mayoría del crecimiento ocurre en los coralites terminales de las puntas de las ramas, mientras que en los segundos todas las partes crecen por igual [4] (Fig. 2). No se sabe aún cómo actúan los factores que determinan la polaridad del crecimiento. En los corales «asta de ciervo», surgen nuevas ramas en cualquier sitio de tramos coloniales preexistentes. Su aparición es anunciada por la diferenciación de un gran coralite apical muy diferente de los restantes y numerosos pólipos pequeños y oscuros que forman los laterales de las ramas. En los corales digitados, en cambio, las nuevas ramas surgen casi siempre de las dicotomías que forman las viejas, y los pólipos apicales se diferencian poco, excepto en poseer crecimiento mucho más rápido.

La influencia de la edad en el crecimiento es grande en unos corales, despreciable en otros. T. Stephenson y A. Stephenson [5] hallaron que la velocidad de crecimiento de ciertos corales decrece en razón inversa al tamaño y a la edad. En el coral rosado de las Antillas (*Manicina areolata*) hemos notado que colonias de unos 0,05 g depositan

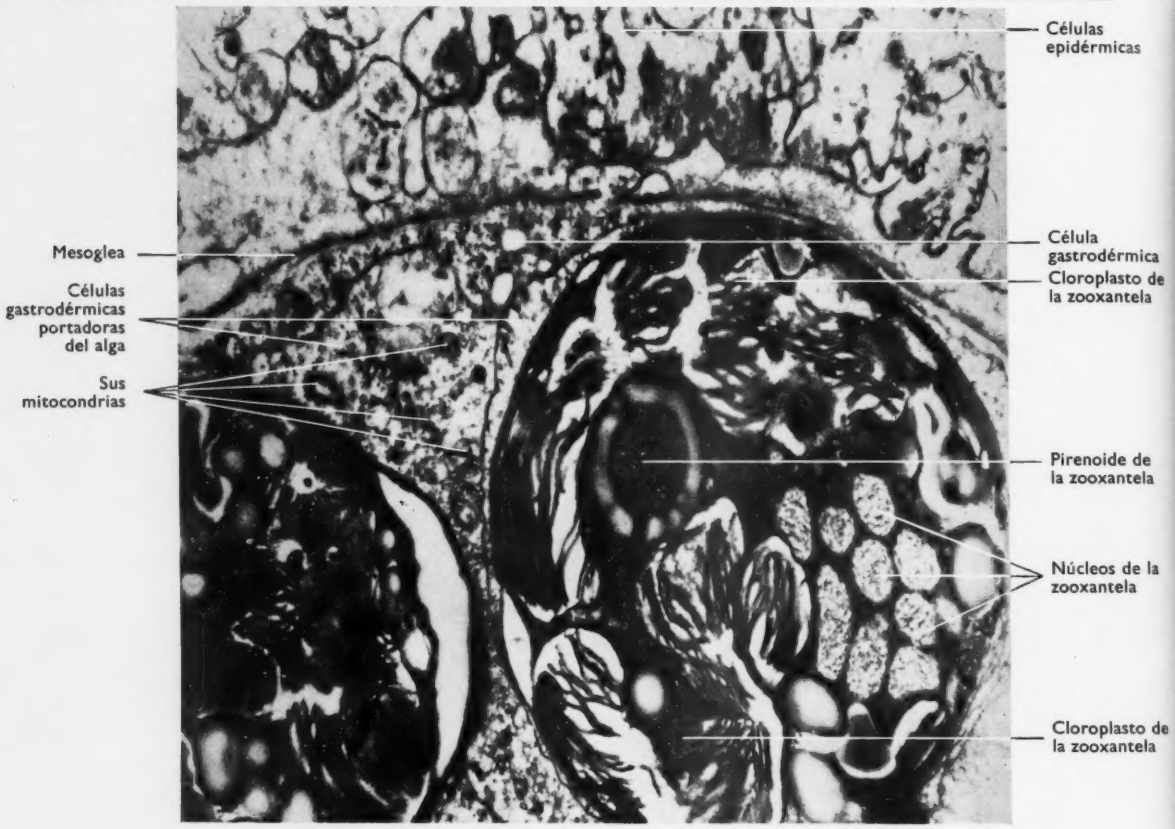


FIGURA 8 – *Microfotografía electrónica de dos zooxantelas en el gastrodermo de un coral. Aumentado 17 400 veces. Las zooxantelas están contenidas dentro de células portadoras especiales que se ven aquí a modo de anillos protoplasmáticos rodeando las células del alga. Nótense las mitocondrias en el citoplasma. Cada zooxantela contiene núcleo, pirenoide y cloroplasto; este último se reconoce como un gran cuerpo estriado en forma de herradura que casi colma la célula del alga.*

calcio en proporción 100 veces mayor por unidad de nitrógeno tisular que otras colonias con peso de 150 g [6] (Fig. 9). Creemos que esto debe tener relación con el peculiar modo de vida del coral. *M. areolata* se suele encontrar desprendido y gusta de fondos arenosos o cespitosos donde no irían bien esqueletos pesados, dados a sumergirse en el sedimento. Por tanto, la retardación de crecimiento en función del tamaño puede constituir un carácter adaptativo a fin de limitar el tamaño de la especie ante la necesidad de mantenerse «a flote» sobre sedimentos sueltos e inestables. No creemos, por el contrario, que haya sensible retardación de crecimiento con la edad o el tamaño en aquellos otros corales hermatípicos que suelen alcanzar enormes proporciones dentro del arrecife, ni en especies ramificadas con crecimiento colonial indefinido que forman setos submarinos irregulares que llegan a alcanzar bastantes hectáreas de extensión.

Hasta la fecha hemos estudiado dos enzimas y tratado de averiguar su posible intervención en el proceso calcificante de los corales. El hallazgo de fosfomonoesterasas en corales [7] nos llevó a proponer las fosfatasas como agentes de calcificación, pero investigaciones histoquímicas posteriores demostraron que tales encimas faltaban en todos los órganos relacionados con la esqueletogénesis [8]. En cambio, después de una serie de experimentos no publicados, hemos podido patentizar que la mayoría de los celentéreos (entre ellos las 24 especies de corales ensayadas) contienen elevadas concentraciones de anhidrasa carbónica, la cual cataliza la hidratación reversible $CO_2 \rightarrow H_2CO_3$ y la disociación ácido carbónico $\rightarrow$carbonato. Se sabe que la anhidrasa

carbónica interviene en la calcificación de la cáscara del huevo de la gallina [9], y en calcificaciones de la ostra [10] y los percebes [11]; por todo esto hemos estudiado la posibilidad de que también desempeñe algún papel en la formación del esqueleto de los corales. Usando inhibidores apenas tóxicos y específicos de la anhidrasa carbónica, se produjo una notable disminución de la cuota de calcio depositado en corales. Cuando éstos contienen zooxantelas la reducción de dicha cuota es mucho menor expuestos a la luz que colocados en la oscuridad; pero cuando carecen de zooxantelas el grado de inhibición es el mismo con luz y sin ella, y la cuota de crecimiento llega a dar valores en extremo pequeños [3].

La luz debe ser el factor ambiental más importante de los que influyen sobre la calcificación de corales hermatípicos en arrecifes. Hace ya mucho tiempo, se sabe que los corales de arrecife sólo pueden prosperar en aguas someras e intensamente iluminadas donde se produzcan sustancias orgánicas fotosintéticas en exceso. Los corales de arrecife crecen siempre hacia la luz y es muy raro encontrarlos en cuevas y otros sitios oscuros donde no queden satisfechas las necesidades lumínicas de la síntesis que realizan las zooxantelas.

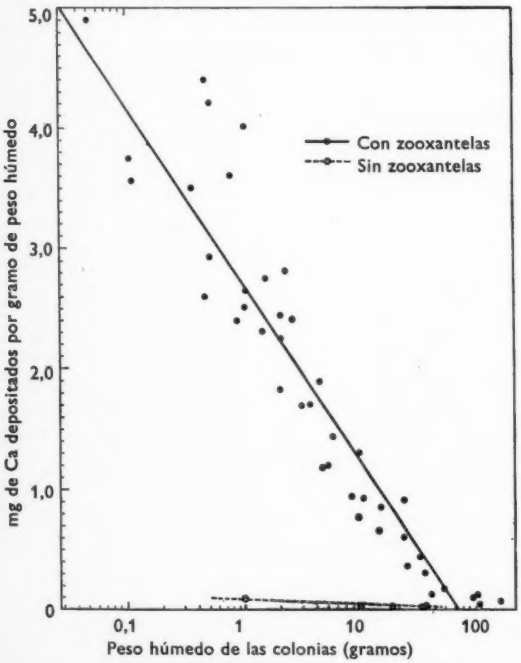


FIGURA 9 – *Velocidad de crecimiento en relación con el tamaño en* Manicina areolata, *pequeño coral que no se sujeta a un sustrato firme. Nótese que las colonias menores crecen aproximadamente* 100 *veces más deprisa (por unidad de peso) que las mayores.*

Hemos ideado experimentos para probar qué efectos produce la variación de intensidad de la luz en la cuota de calcificación de los corales que construyen arrecifes, reproduciendo aproximadamente las condiciones naturales; así hemos visto que el consumo de calcio es máximo a mediodía de un día soleado; que ese consumo se reduce como en un 50% con día nublado, y llega a disminuir casi 90% reinando completa oscuridad [4]. El cociente «calcificación a la luz: calcificación en oscuridad» varía según especies desde 3 : 1, hasta 23 : 1, siendo en promedio 10 : 1. Esta notable correlación entre el crecimiento de corales e intensidad de luz, se explica por la presencia de las zooxantelas, fenómeno que se ha podido contraprobar desposeyendo de estas algas a corales de arrecife normalmente lozanos, por el sencillo procedimiento de mantenerlos antes varios meses en completa oscuridad. Su calcificación se hizo muy lenta y reveló ser independiente de la intensidad de la luz [3].

LA COMPOSICION DEL ESQUELETO CORALINO

Problema importante y todavía mal aclarado es el referente al origen del calcio depositado en las calcificaciones coralinas. De nuestros experimentos, realizados en su mayoría con corales no alimentados, sumidos en un medio con calcio radiactivo suministrado en forma $^{45}CaCl_2$, cabe deducir que estos animales son capaces de absorver directamente Ca^{++} del agua de mar, y que debe ser aportado muy poco Ca con el alimento, el cual se compone de diminutos organismos planctónicos. Una prueba indirecta en favor del mismo punto de vista se encuentra en el hecho de que, al parecer, los corales son incapaces de distinguir el calcio del estroncio, depositando uno y otro dentro de su esqueleto en iguales proporciones que se hallan en el agua de mar [12]. La mayoría de los restantes animales, especialmente los crustáceos, que constituyen una parte importante de la dieta de los corales, parecen excluir el estroncio. Por tanto, si el calcio viniera nada más que en estos alimentos, debiera depositarse en los corales con escaso o ningún acompañamiento de estroncio.

Nada concreto sabemos sobre el mecanismo de transporte del calcio dentro del coral. No parece que el calcio sea concentrado previamente en ningún tejido antes de ser depositado en el esqueleto; antes al contrario, la concentración de calcio en los tejidos del coral tiende a ser más

baja que en el agua de mar [13]. Dado que el $CaCO_3$ es ligeramente soluble en agua de mar, se produce una reacción de equilibrio en virtud de la cual se intercambia calcio entre el esqueleto del coral y el mar; en condiciones normales deja de producirse una solución pura debido a que el mar de los arrecifes está sobresaturado con respecto al $CaCO_3$. Pero esa tendencia del esqueleto a intercambiar calcio con el mar resulta reducida drásticamente desde el momento en que el esqueleto queda cubierto por una capa de materia viva intacta. Esta acción protectiva cesa tan pronto como muere el polipario: entonces la cuota de intercambio del equilibrio citado aumenta en varios órdenes de magnitud. Esto demuestra que la capa viva de polipario es algo «impermeable» al calcio [14]. La situación es la inversa que en los Vertebrados, donde el calcio de los huesos continúa siendo relativamente movible y se intercambia ilimitadamente con el calcio disuelto en los humores orgánicos.

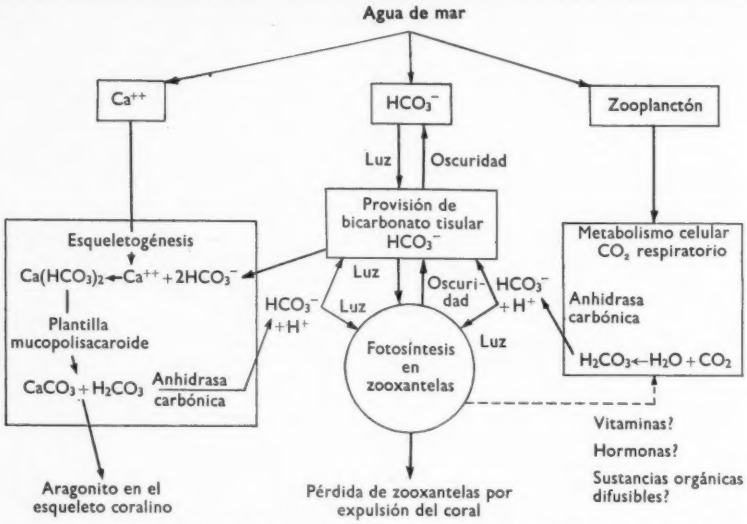


FIGURA 10 – *Posibles rutas de calcificación en corales de arrecife en relación con la respiración tisular y la fotosíntesis de zooxantelas.*

El esqueleto coralino tiene también la particularidad de que se compone totalmente a base de $CaCO_3$ con estructura cristalina de aragonito. La calcita brilla por su ausencia. Este hecho debe haber repercutido tanto en la composición química del esqueleto de los corales como en la distribución geográfica de éstos. Al ser el esqueleto de aragonito puro, falta prácticamente en el mismo carbonato magnésico, a pesar de que este compuesto abunda más en el mar que el carbonato cálcico. Los organismos que depositan calcita y aragonito en su esqueleto llevan por lo menos 10 veces más de $MgCO_3$ que los corales [15]. Según H. Lowenstam [16], esta incapacidad de los corales para producir calcita explica la escasez de Escleractinias en mares fríos, y su abundancia en los trópicos. Los organismos capaces de producir calcita y aragonito, tienden a depositar más cantidad de la primera en invierno, y más del segundo en verano. Los corales, incapaces de sustituir aragonito por calcita, quedarían así condenados a no prosperar en aguas frías.

El uso de isótopos estables ha permitido revelar datos importantes acerca del probable origen de la fracción carbonato del esqueleto coralino. Diversos investigadores [17–19] concuerdan en que las razones $^{18}O : {}^{16}O$, y $^{13}C : {}^{12}C$ del carbonato coralino, no son las mismas que en el carbonato disuelto en el agua de mar. Según C. Emiliani [19] la razón oxígeno: isótopo podría variar si hubiera un intercambio químico entre el oxígeno liberado por las zooxantelas y el carbonato depositado. También en el caso de que el carbonato del esqueleto sea de origen metabólico más bien que marino, cabe esperar cambios en la razón de los isótopos.

EL MECANISMO DE LA CALCIFICACION

El origen metabólico del carbonato esquelético que parece deducirse con los isótopos se halla de acuerdo con nuestros resultados experimentales; Hoy es posible imaginar algunas de las más probables reacciones que deben ocurrir en la calcificación de los corales. Al parecer (Fig. 10), el calcio es absorvido del agua del mar como Ca^{++} y transferido por un mecanismo no conocido todavía, hasta el lugar de calcificación, que debe hallarse justamente por fuera de la epidermis calicoblástica. Aquí el Ca^{++} es absorbido en una sustancia mucopolisacaroide que forma parte de la matriz orgánica y actúa a modo de plantilla donde ocurren las fases preliminares de la mineralización esquelética. Allí el Ca^{++} se combina con el bicarbonato metabólico primario para dar bicarbonato cálcico, y más tarde carbonato cálcico. La proporción en que precipita el carbonato

cálcico quedaría regulada en principio por el doble sistema

$$Ca^{++} + 2HCO_3^- \rightleftharpoons Ca(HCO_3)_2 \quad (1)$$

$$Ca(HCO_3)_2 \rightleftharpoons CaCO_3 + H_2CO_3 \quad (2)$$

$$H_2CO_3 \xrightleftharpoons{\text{anhidrasa carbónica}} H^+ + HCO_3^- \quad (3)$$

$$H_2CO_3 \xrightleftharpoons{\text{anhidrasa carbónica}} CO_2 + H_2O \quad (4)$$

en el lugar que ocurre la mineralización. Factor decisivo aquí es la velocidad con que se retire del sistema el H_2CO_3 en virtud de las reacciones 3 ó 4, las cuales son catalizadas por anhidrasa carbónica. Dado que el agua del mar tropical está superficialmente sobresaturada de $CaCO_3$, bastan pequeños cambios en la velocidad de las reacciones 3 y 4 para provocar una gran aceleración de las 1 y 2. En las condiciones descritas los cambios de energía libre son muy pequeños, y, por tanto, también será reducido el trabajo que han de realizar los corales en la esqueletogénesis. El mecanismo propuesto permite comprender fácilmente por qué la presencia de zooxantelas acentúa considerablemente el crecimiento de los corales de arrecife. Tanto el CO_2 como el HCO_3^- son fijados en la fotosíntesis de las algas. Este hecho debe producir el mismo efecto que la anhidrasa carbónica con relación al sistema conjunto antes expuesto. Cuando los corales de arrecife quedan sometidos a la acción de la luz, zooxantelas y fermentos actúan sinérgicamente; en la oscuridad sólo actúan los fermentos.

CONCLUSIONES

Aunque ya no quedan dudas sobre la cooperación de las zooxantelas en la esqueletogénesis de los corales según un mecanismo similar al descrito arriba, es probable que dichas algas influyan también en otros aspectos de la bioeconomía. La íntima relación estructural entre alga y coral se observa en la microfotografía electrónica de la Fig. 8. Aún sigue viva la polémica entre los que sostienen que el único papel de las zooxantelas consiste en proveer al coral de oxígeno y retirar el anhídrido carbónico [20] y los que creen que las zooxantelas son adémas aprovechadas por el coral en calidad de alimento [21]. Nosotros suscribimos la opinión de que dichas algas acentúan la eficiencia metabólica del coral hospedador, tanto por su producción de oxígeno *in situ* y absorción de excreta minerales gracias a la fotosíntesis, como por la liberación de cantidades vestigiales de factores vitamínicos u hormonoides [3, 22]. Creemos también, de acuerdo con C. M. Yonge [23], que las zooxantelas no parecen ser aprovechadas por el coral en calidad de alimento.

Nuestros experimentos permiten afirmar que las zooxantelas, con su potencial intervención química en el proceso de calcificación, han debido desempeñar un importante papel en la evolución y desarrollo de las comunidades coralinas recifales, propias de aguas someras. Tan colosales desarrollos en lucha incesante contra los ataques del mar sólo pudieron ser posibles a partir del momento en que la deposición calcárea alcanzase velocidad suficiente como para compensar la pérdida producida por desgaste orgánico y físico.

AGRADECIMIENTO

Nuestras investigaciones en Jamaica, aún en curso, son parte de un programa conjunto con la *New York Zoological Society*, subvencionado por la *National Science Foundation*, y el *Office of Naval Research* de la Marina de los Estados Unidos de Norteamérica.

REFERENCIAS

[1] GARDINER, J. «Corals and Atolls». Macmillan & Co. Ltd., Londres. 1931.
[2] HYMAN, L. «The Invertebrates». Vol. 1, McGraw-Hill Book Co. Inc., Nueva York. 1940.
[3] GOREAU, T. *Biol. Bull., Woods Hole*, **116**, 59, 1959.
[4] GOREAU, T. y GOREAU, N. *Ibid.*, **117**, 239, 1959.
[5] STEPHENSON, T. y STEPHENSON, A. *Sci. Rep. Gr. Barrier Reef Exped.*, **3**, 167, 1933.
[6] GOREAU, T. y GOREAU, N. *Biol. Bull., Woods Hole*, **118**, 419, 1960.
[7] *Idem. Proc. Nat. Acad. Sci., Wash.*, **39**, 1291, 1953.
[8] *Idem. Nature, Lond.*, **177**, 1029, 1956.
[9] BENESCH, R., BARRON, N. y MAWSON, C. *Ibid.*, **153**, 138, 1944.
[10] WILBUR, K. y JODREY, L. *Biol. Bull., Woods Hole*, **108**, 359, 1955.
[11] COSTLOW, J. *Physiol. Zoöl.*, **32**, 177, 1959.
[12] ODUM, H. *J. Inst. Mar. Sci. (Texas)*, **4**, 39, 1957.
[13] GOREAU, T. y BOWEN, V. *Science*, **122**, 1188, 1955.
[14] GOREAU, T. y GOREAU, N. *Biol. Bull., Woods Hole*. (En prensa.)
[15] CHAVE, K. *J. Geol.*, **62**, 267, 1954.
[16] LOWENSTAM, H. *Ibid.*, **62**, 284, 1954.
[17] LOWENSTAM, H. y EPSTEIN, S. *Ibid.*, **65**, 364, 1957.
[18] CRAIG, H., citado por REVELLE, R. y FAIRBRIDGE, R., en *Mem. geol. Soc. Amer.*, **67**, (1), 239, 1957.
[19] EMILIANI, C. *J. Geol.*, **63**, 538, 1955.
[20] YONGE, C. M. *Sci. Rep. Gr. Barrier Reef Exped.*, **1**, 353, 1940.
[21] ODUM, H. y ODUM, E. *Ecol. Monogr.*, **25**, 291, 1955.
[22] GOREAU, T. y GOREAU, N. *Science*, **131**, 668, 1960.
[23] YONGE, C. M. *Mem. geol. Soc. Amer.*, **67**, (1), 429, 1957.

Los comienzos de la fabricación del fósforo

Arthur Albright, que inició la fabricación del fósforo en Gran Bretaña, nació hace 150 años. Este es, por tanto, momento apropiado para resumir la historia del descubrimiento y de los comienzos de la fabricación de tal elemento.

El fósforo fue descubierto por Hennig Brand, alquimista y curandero, hacia 1670, al destilar orina en sus intentos por descubrir una sustancia capaz de transmutar la plata en oro, donde el carbón producido al carbonizar el residuo orgánico actuaba como agente reductor de los compuestos presentes normalmente en la orina. El elemento, que llamó *kaltes Feuer*, era una curiosidad química y Brand consiguió un éxito social considerable al mismo tiempo que fama como científico. Johann Kunckel se enteró del descubrimiento y, con su amigo Johann Daniel Krafft, fue a visitar a Brand. Según la versión generalmente aceptada, Brand no quiso revelar como había obtenido el fósforo y Kunckel tuvo que redescubrir el método. Descubrió también un procedimiento para moldear el fósforo en barritas y anunció su empleo en medicina en su tratado *Phosphorus Mirabilis and its wonderful shining pills*. Sin embargo, en Inglaterra el primero en exhibir el fósforo en la corte de Carlos II y en la *Royal Society* fue Krafft. Boyle presenció los experimentos y escribió entusiasmado cómo «las chispas centelleantes, sin causar ningún daño a la alfombra turca en que yacían, continuaron brillando durante un buen rato». No se sabe con certeza si Boyle tuvo que redescubrir el método de preparación, pero él mismo afirmó que la única información que consiguió de Krafft era que la «materia principal» era «algo que pertenecía al cuerpo humano». Lo que sí es cierto es que Boyle fue el primero en divulgar la preparación del fósforo en forma de solución o suspensión acuosa en su *The Aerial Noctiluca* (1680) y en forma sólida en *The Icy Noctiluca* (1681–82); también fue el primero en dar una descripción científica del elemento y de sus propiedades.

El ayudante de Boyle, Ambrose Godfrey Hanckewitz, que se estableció como farmacéutico con el nombre de Godfrey, anunciaba medicamentos de la época tales como sales de oler, sal de Glauber, bálsamos y cordiales y también que él era «el único en Londres que prepara fósforo inflamable . . . sin adulterar, a cincuenta chelines la onza al por mayor, y a tres libras esterlinas la onza al por menudo». Incluso a este precio se vendía el fósforo con facilidad y Godfrey viajó y extendió su venta por toda Europa, muriendo en la opulencia en 1741.

El coste del fósforo se debía al escaso rendimiento del proceso y se mantuvo elevado hasta que en 1777 Scheele descubrió un método para prepararlo a partir de cenizas de huesos. La primera aplicación comercial del proceso en Gran Bretaña data de 1844, cuando Arthur Albright persuadió a Edmund Sturge, con quien había formado una compañía unos años antes, para que empezaran a fabricar fósforo. La compañía tenía su domicilio en Selly Oak, Birmingham, pero se trasladó al cabo de poco tiempo a Oldbury. Su intención era producir fósforo para los fabricantes de cerillas. La producción nacional era entonces muy limitada — alrededor de una tonelada anual — y la sustancia tenía que importarse en grandes cantidades.

Un fabricante francés de gelatina, *La Société Vve. Dupasquier, fils et Coignet* había empezado la producción de fósforo en 1838. Las importaciones en Gran Bretaña alcanzaron un máximo de £2500 en 1844. Cuando Albright decidió competir con la casa francesa, sufría la desventaja de tener que importar los huesos, pero en cambio tenía la ventaja, que resultó decisiva, de contar con carbón barato. El carbón del Black Country se vendía a un chelín y medio la tonelada, mientras que la compañía francesa tenía que pagarlo a quince chelines. Las importaciones bajaron rápidamente y en 1851 Gran Bretaña se había convertido en exportadora.

La primera materia ordinaria eran las cenizas de huesos de Sudamérica, si bien Albright hizo un viaje a Galatz, en el Danubio, para ver si podía utilizar los residuos de los mataderos de las fábricas de conservas allí establecidas. Como resultó imposible embarcar los huesos sin tratamiento previo, se vió obligado a construir hornos en aquel sitio. Las cenizas de huesos — posteriormente se utilizaron fosfatos naturales — se trataban con ácido sulfúrico y el ácido fosfórico obtenido se concentraba, se mezclaba con carbón vegetal, se secaba y se molía, quedando dispuesto así para las retortas. Estas retortas — vasijas de arcilla refractaria en forma de botella, de unos 120 cm de largo — se colocaban en grupos de

veinticuatro en hornos de carbón y estaban provistas de un cuello de hierro que conducía el vapor de fósforo a los condensadores. La destilación duraba unas 16 horas; el fósforo se condensaba bajo agua para evitar su oxidación por el aire y después se trasvasaba con cucharones dejando que se solidificase formando tortas de unos 13 kg, las cuales se blanqueaban con ácido crómico. El fósforo blanqueado se hacía pasar por un cilindro calentado con vapor, se filtraba a través de una gamuza y se moldeaba en barras.

Las descripciones de la época pintan un cuadro vívido de la industria británica del fósforo en aquellos tiempos. Las destilerías de fósforo constituían un espectáculo digno de presenciar, con «grandes llamas amarillas» y trozos de fósforo ardiendo que caían «como lluvia de bolas de fuego»; el incesante burbujeo del fósforo que se condensaba en las pilas y un «hedor insoportable de los derivados del fósforo». La combinación de esta fábrica con la vecina de sosa de Chance, que utilizaba el método Leblanc, con su efusión de desperdicios alcalinos desagradables, debió contribuir a convertir Oldbury de un lugar agradable y hermoso, como lo describió un historiador local, anidado en las verdes laderas de Rowley Hills, en un desierto, «una ciudad de una fealdad sin limites, casi arrogante en su horror».

En esta fábrica británica se introdujeron muchas mejoras en el proceso de fabricación. Los antieconómicos hornos de calentamiento directo se sustituyeron por retortas calentadas con gas de gasógeno que utilizaban el principio del regenerador Siemens; en realidad, este principio se utilizó en esta fábrica y en la vecina de vidrio de Chance antes de su adopción general por los fabricantes de acero. Estos hornos fueron sustituidos más tarde por hornos eléctricos de operación continua utilizando un método propuesto por Wöhler en 1829 que consiste en calentar una mezcla de cenizas de huesos, arena silícea y carbón. El éxito del método depende de que se alcance una temperatura suficientemente elevada para que se pueda separar la escoria cuando está fundida. Los primeros intentos se debieron a J. B. Readman, de Edimburgo, quien utilizó un alto horno pero no llegó a la temperatura necesaria. En los Estados Unidos se utilizaron más adelante altos hornos para la producción de fósforo, pero después de resolver todas las dificultades técnicas se vió que tenían que ser muy grandes para que resultasen económicos. Readman también obtuvo una patente para un proceso semejante utilizando calefacción eléctrica, patente que fue adquirida por la *Electric Construction Company* de Wolverhampton. Este grupo formó la *Phosphorus Company* en 1890 y comenzó empleando el horno eléctrico con dos electrodos horizontales. Este modelo fue sustituido por otro mejor con electrodos verticales poco después de que la compañía de Albright, que se había convertido en *Albright and Wilson*, se hiciera cargo de aquélla.

Albright estaba profundamente preocupado por los peligros que la fabricación del fósforo representaba para la salud del personal y la seguridad de la planta. El fósforo amarillo, la variedad alotrópica que se preparaba por los métodos mencionados hasta ahora y que se utilizaba en la fabricación de cerillas, se inflamaba espontáneamente y era tóxico, causando la gangrena del maxilar. Anton Schrötter, de Viena, descubrió en 1845 que calentando el fósforo amarillo en atmósfera inerte se convertía en una forma estable y no tóxica, el fósforo rojo. La reacción era exotérmica y había originado explosiones, por lo que concluyó que el proceso no tenía valor comercial.

En 1849, Schrötter fue invitado por Albright a una reunión de la *British Association* en la que presentó un trabajo sobre la nueva variedad alotrópica. Albright decidió que el proceso era practicable, compró la patente de Schrötter y empezó a trabajar para encontrar un medio de evitar las explosiones. Con su empleado Julius Lowe proyectó un autoclave de fundición con un pequeño tubo que actuaba de válvula de seguridad y eliminaba el peligro de explosión. Albright empezó entonces una campaña para convencer a los fabricantes de cerillas europeos que utilizaran el fósforo rojo en lugar del amarillo.

La producción de cerillas con fósforo rojo que se encendiesen al frotar en cualquier superficie, resultó extraordinariamente difícil. Otra solución consistía en fabricar cerillas de seguridad, en que todo el fósforo está en la caja. Los primeros en llevarla a cabo con éxito fueron los hermanos suecos Lundström en 1855, quienes encargaron inmediatamente tales cantidades de fósforo rojo que Albright imaginó que se iban a destinar a fabricar municiones y como era cuáquero se negó a suministrarlas. No obstante, los compradores consiguieron tranquilizarlo y Albright envió el fósforo; los hermanos Lundström empezaron así la fabricación de cerillas en gran escala. El descubrimiento fue la base del éxito de la industria sueca de cerillas y de *Albright and Wilson*, marcando el comienzo del período moderno de la producción y empleo del fósforo.

La separación de isótopos mediante procesos químicos reversibles

E. GLUECKAUF

Cuando se admitió la existencia de isótopos se creyó que, debido a la identidad de sus configuraciones electrónicas, sólo era posible separarlos por métodos físicos. La obtención del deuterio mediante electrólisis del agua probó que también eran posibles los métodos quimicos de separación; ahora tales métodos son no sólo muy usados sino los preferidos en ciertos casos. Se estudian aquí los fundamentos teóricos y se examinan las ventajas y limitaciones de los métodos químicos para separación de isótopos.

CONSIDERACIONES GENERALES

En los pasados años han tenido muy diversos usos los isótopos estables aislados. La mayoría de las sustancias aisladas se emplean para estudiar propiedades nucleares, pero también se necesitan cantidades importantes para estudiar problemas físicoquímicos, para análisis químicos por el método de la dilución isotópica, para investigaciones médicas y biológicas, y como sustancias de partida para la preparación de isótopos radiactivos. Mas, pese a lo útiles que son, la dificultad de aislar los isótopos limita su empleo. Por ejemplo, el ^{47}Ca radiactivo, con un período de 4,7 días, podría ser uno de los isótopos más útiles en el diagnóstico del cáncer si se dispusiera de él con facilidad; puede producirse irradiando el ^{46}Ca con neutrones, pero este isótopo natural, aunque el calcio es muy abundante, solamente se halla contenido en el elemento ordinario en 32 partes por millón, por lo que su enriquecimiento es un proceso difícil y caro, que hace alcanzar un precio de casi 1000 libras esterlinas por miligramo de ^{46}Ca. Esto plantea la cuestión de si los métodos químicos serían más baratos que los físicos para separar isótopos.

Tras los trabajos (1912–13) de Paneth en Viena y de von Hevesy en Manchester, quienes demostraron que el Radio-D (un isótopo del plomo) y el plomo ordinario no podían ser separados por medios químicos, se afianzó la creencia de que los isótopos tenían idéntico comportamiento químico y era por tanto imposible separarlos químicamente. En 1919 Lindemann (luego Lord Cherwell) calculó que, en principio, los isótopos debían ser separables, aunque las diferencias eran tan pequeñas que habría poca esperanza de conseguirlo en la práctica. En la década de 1920 muchos laboratorios lograron, principalmente por métodos destilatorios, pequeños cambios en las relaciones isotópicas de elementos como el neón, el cloro, el cinc y el mercurio. Sin embargo, Urey demostró (1932) que por descomposición electrolítica del agua se llegaba a un enriquecimiento y que por electrólisis reiteradas se podría conseguir deuterio prácticamente puro [3]. Desde que se comprobó que los métodos químicos podían utilizarse para separar isótopos fueron estudiados numerosos procedimientos y ahora se conocen bien las técnicas fundamentales. Las cantidades de isótopos que ahora se aislan varían mucho según las exigencias; van desde varios gramos al día para sustancias interesantes en investigación (como ^{10}B, ^{13}C, ^{15}N y ^{18}O) hasta kilogramos al día para isótopos como D y ^{235}U, necesarios en la industria atómica. El ^{6}Li ocupa una situación intermedia.

Los átomos isotópicos tienen configuraciones electrónicas idénticas y por ello muestran esencialmente el mismo comportamiento químico; sin embargo, difieren en cuanto a sus masas atómicas. En los gases monoatómicos esta diferencia afecta sobre todo a las energías de la fase condensada en el punto cero y, por tanto, el isótopo ligero es siempre más volátil. Sin embargo, en las moléculas poliatómicas la vibración y la rotación contribuyen también al contenido energético y pueden o reforzar o mermar la energía en el punto cero; a su vez la combinación afectará a la volatilidad y a las actividades termodinámicas. Así, moléculas isotópicas incluso con el mismo peso molecular, como HT y D_2, tienen tensiones de vapor muy distintas a una cierta temperatura (Fig. 1). Los efectos de vibración y de rotación pueden más que contrarrestar el efecto de la diferencia de masas; se ha demostrado [1*a*] que el $^{12}C^{18}O$ es ligeramente más volátil que el $^{13}C^{16}O$ aunque aquella molécula es más pesada. A 60° K

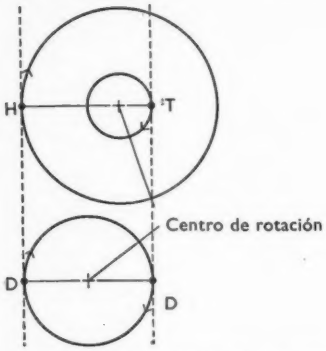


FIGURA 1 – *El efecto de la rotación de las masas de los isótopos sobre el volumen molecular para HT y D_2.*

la razón entre las tensiones de vapor de los dos compuestos es $1{,}0028 = \alpha$, llamada factor de separación del equilibrio de una etapa. Como las mezclas de isótopos son «soluciones ideales», las fracciones molares (X) en las dos fases de un equilibrio entre líquido y vapor están ligadas por

$$\ln\left(\frac{X_1}{1-X_1}\cdot\frac{1-X_2}{X_2}\right) = \ln\alpha \simeq \alpha - 1 = \varepsilon$$

donde ε es el parámetro de separación.

La separación de isótopos puede conseguirse, en principio, por dos tipos de procesos: los de velocidad, en los que una especie o reacciona o se difunde más rápidamente que la otra, y los procesos de equilibrio, en los que una de las especies es favorecida termodinámicamente en una de las fases. A los primeros corresponden las separaciones por difusión en membranas, difusión térmica, centrifugación, electrólisis, electromigración, efectos cinéticos isotópicos y, en cierto modo, hasta la separación electromagnética. De la segunda clase son la destilación y las reacciones químicas de intercambio. Cuando, como es corriente, la diferencia entre velocidades o entre constantes de equilibrio es pequeña, no es posible aislar completamente los isótopos en una sola operación; los procesos han de repetirse muchas veces, miles en ciertos casos, antes de conseguir el grado de separación deseado.

Esta necesidad de repetir destaca una diferencia fundamental entre los procesos de velocidad y los de equilibrio. Aquéllos son reacciones irreversibles y en cada etapa hay que proporcionar cantidades apreciables de energía. Sin embargo, los procesos de equilibrio pueden llevarse de una forma casi reversible, y, haciendo uso de procesos con varias etapas en contracorriente, se requiere virtualmente energía sólo en los extremos de los ciclos. Para separaciones comparables (esto es con iguales valores de α) los procesos de equilibrio bien efectuados necesitan sólo una fracción muy pequeña de la potencia exigida por los procedimientos de velocidad.

El consumo mínimo de energía W necesario para aislar un mol de compuesto isotópico puro, que al principio representa la fracción molar X, se ha calculado que es $> 4\,RT/\varepsilon^2 X$ para un proceso irreversible. Si es reversible, con n platos teóricos por columna, este valor es sólo $5{,}3\,RT/n\varepsilon^2 X$ (donde $n \leqslant 500$) según London [1*b*]; esto es dos órdenes de magnitud menos para las mismas condiciones. Pero los factores de separación no son realmente iguales para los dos tipos de procesos, y para átomos o moléculas isotópicos muy pesados, como UF_6, el parámetro de separación para los procesos irreversibles (como la difusión) supera en mucho al de los procesos reversibles como la destilación (Tabla 1). Sin embargo, para átomos y moléculas relativamente ligeros, los procesos químicos tienen factores de separación del mismo orden que los de los procesos irreversibles, y en este respecto es donde resulta importante su aplicación práctica.

TABLA I

Especies isotópicas	Parámetro de separación ε	
	Destilación	Difusión
H_2/HD	0,73	0,225
$^{10}BF_3/^{11}BF_3$	−0,0065	0,0074
$^{20}Ne/^{22}Ne$	0,0445	0,049
$^{16}O_2/^{16}O^{18}O$ ..	0,0052	0,030
$^{36}A/^{40}A$	0,006	0,055
$^{235}UF_6/^{238}UF_6$ ..	< 0,0001	0,0043

El ejemplo mejor conocido de un proceso químico reversible con varias etapas es la destilación fraccionada, que supone el reiterado equilibrio entre una fase gaseosa y una líquida. En este caso es la misma especie química en ambas fases:

$$\underset{\text{Líquido}}{^{20}Ne} + \underset{\text{Gas}}{^{22}Ne} \overset{\varepsilon=0{,}044}{\rightleftharpoons} \underset{\text{Gas}}{^{20}Ne} + \underset{\text{Líquido}}{^{22}Ne}$$

aunque varían sus proporciones en las dos fases. Se consigue el reflujo sencillamente por ebullición y condensación alternadas.

Si las especies que se intercambian no son del mismo tipo químico se tiene una reacción de intercambio entre gas y líquido, como en

$$\underset{\text{Gas}}{{}^{14}NO} + \underset{\text{Solución}}{H^{15}NO_3} \overset{\varepsilon=0{,}055}{\rightleftharpoons} \underset{\text{Gas}}{{}^{15}NO} + \underset{\text{Solución}}{H^{14}NO_3}$$

Para el reflujo se necesita convertir el NO en HNO_3 en la cabeza de la columna, y el HNO_3 en NO en el fondo, como se detallará luego. En general, las reacciones de intercambio químico tienen mayores factores de separación que la destilación. Para la destilación de los isótopos del nitrógeno, $\varepsilon = P({}^{14}N^{14}N)/P({}^{14}N^{15}N) - 1 = 0{,}0062$ a 64,8° K, y $\varepsilon = 0{,}055$ para el intercambio químico antes descrito.

Otros procesos reversibles pueden comprender dos fases líquidas no miscibles, como en la extracción con disolvente; o una de las fases puede ser sólida, como en el intercambio de iones y en la cromatografía de gases, con la segunda fase entonces líquida o gaseosa.

LA DESTILACION

El factor más importante para la separación es el factor (α) de separación por etapa, o mejor, el parámetro $\varepsilon = \alpha - 1$. Todas las características importantes de la columna, como tamaño y precio, consumo de energía, y tiempo de equilibrio, dependen de ε^2. En el caso de los equilibrios de presión de vapor α es la relación entre las tensiones de vapor de las dos especies isotópicas. El valor de ε depende de la temperatura; bajo 100° K suele ser proporcional a $1/T^2$. Como el efecto de separación de una equilibración en una etapa es pequeño, se usa como cascada en contracorriente una columna de reflujo. Para la separación de isótopos no es muy útil el tipo primitivo de columna con platos de burbujeo debido a la altura relativamente grande de la etapa individual, y a su gran retención de sustancia. Ahora se emplean columnas que contienen relleno adecuado, y esto asegura un contacto permanente entre las fases en condiciones más ventajosas. Tal columna se considera con n platos teóricos si su funcionamiento equivale a n equilibrios sucesivos. El cambio total en concentración isotópica para una mezcla binaria, cuyas fracciones molares sean X y $1 - X$ para dos especies isoméricas, entre la cabeza (T) y el fondo (B) de tal columna, para un reflujo total, viene dado por

$$\frac{X_T}{X_B} \cdot \frac{1 - X_B}{1 - X_T} = \alpha^n = \exp(\varepsilon n) \quad \text{si } \varepsilon \ll 1$$

El número de platos teóricos necesario para dar un cierto enriquecimiento se indica en la Tabla II.

TABLA II

Número de platos teóricos (n) *necesario para diversos factores de enriquecimiento* (R) *y de separacion* (α), *supuesto un reflujo total*

R = factor de enriquecimiento total ..	10	100	1000	10 000
α	n			
2,0	3	7	10	13
1,4	7	14	21	27
1,1	24	48	73	97
1,05	47	94	141	188
1,02	115	230	345	460
1,01	230	460	690	920
1,005	460	920	1380	1840

Cuando se retira producto, incluso a un ritmo lento, el enriquecimiento es considerablemente menor. Esto se demuestra [1*c*] en la Fig. 2 relativa al enriquecimiento isotópico del ${}^{10}B$ ($X_0 = 0{,}2$, $\varepsilon = 0{,}025$). X es la fracción molar del ${}^{10}B$ en el producto, y la abscisa da la velocidad de retirada P/B donde P es el ritmo de la extracción del producto y B la velocidad de progreso en la columna. Se ve que incluso con una columna infinitamente larga la velocidad de retirada P/B debe mantenerse inférior a 0,5%, ó $< 0{,}2\varepsilon$ si se quiere lograr la máxima pureza en el producto.

La altura de un plato teórico depende sobremanera del tipo de relleno, que debe presentar una gran superficie de contacto con la corriente gaseosa y a la vez tener la menor retención posible de líquido, para obtener así rápidamente el equilibrio. En teoría las menores alturas de platos deben lograrse con tubos vacíos muy estrechos, de 1–2 mm de diámetro interno, en los que el líquido desciende por la pared en forma de una película delgada. Pero hay considerables dificultades prácticas en el empleo de tales columnas estrechas con paredes mojadas, sobre todo el escaso flujo a su través; esto hace necesario el empleo de hasta 100 tubos en paralelo si se quieren obtener cantidades útiles de producto [2]. Para el trabajo de laboratorio es más práctico emplear tubos más anchos repletos de piezas pequeñas de relleno sin ordenar. Con el empleo de tela metálica enrollada en cilindros, como los rellenos de tejido Dixon (Fig. 4), que también dan pequeña caída de presión por plato, la altura de

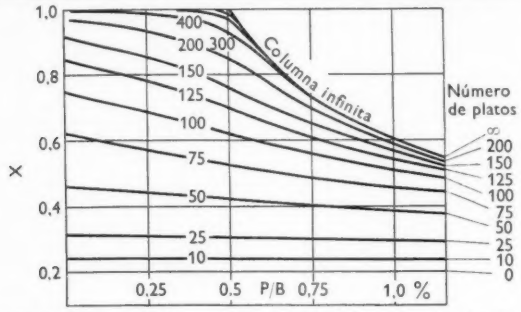


FIGURA 2 – *El efecto de la velocidad de extracción (P/B) sobre el contenido de ^{10}B del producto (X) durante la separación de los isótopos del boro* ($\varepsilon = 0{,}025$).

un plato teórico puede mantenerse tan pequeña como 1 cm en columnas de poco diámetro. Sin embargo, para columnas industriales muy grandes es más económico emplear hoja metálica perforada y extendida como las «Spraypak» (Fig. 5) o «Panapak»; aunque dan alturas teóricas de platos de unos 45 cm, lo que permiten por ellas flujos mucho mayores.

Un ejemplo interesante de separación de isótopos por destilación es el que obtiene oxígeno pesado (^{17}O y ^{18}O) a partir del agua [1*g*]. De éstos isótopos el escaso ^{17}O (que está contenido en el oxígeno natural sólo en 0,037%) tiene especial interés porque su resonancia magnética nuclear es tal que permite un análisis no destructivo, abriendo así grandes perspectivas para emplearlo como indicador, sobre todo en biología y en medicina. Como el factor de separación disminuye al aumentar la temperatura, la destilación se hace a bajas temperatura y presión. El proceso se realiza en dos etapas. Una sección de enriquecimiento previo que consiste en varias columnas de 10 cm y 9 m de largo, trabajando en paralelo, da un producto enriquecido que pasa a una cascada de cinco columnas, dos de ellas para agotamiento y tres para ulterior enriquecimiento. Esta cascada representa más de 2000 platos teóricos y el aparato produce unos 10 g/día de $H_2{}^{18}O$ sumamente enriquecida.

LA DESTILACION CON INTERCAMBIO

Una variación interesante del proceso de destilación ordinaria es la llamada destilación con intercambio, que puede ser empleada si un compuesto líquido se disocia en la fase gaseosa, por ejemplo:

$$BF_3(C_2H_5)_2O \rightleftharpoons BF_3 + (C_2H_5)_2O$$

Aquí el factor que conduce al enriquecimiento isotópico no es la diferencia entre las tensiones de vapor de los dos compuestos sino la reacción de intercambio entre el BF_3 gaseoso y el complejo $BF_3(C_2H_5)_2O$ líquido:

$$^{10}BF_3(C_2H_5)_2O + {}^{11}BF_3 \rightleftharpoons {}^{11}BF_3(C_2H_5)_2O + {}^{10}BF_3$$

Esto une la sencillez de funcionamiento de un proceso destilatorio con la ventaja del factor de separación considerablemente mayor en el intercambio químico ($\varepsilon = 0{,}034$ en vez de 0,0075 como para la destilación del BF_3). El método se usó primero en los Estados Unidos (1943) pero los detalles no se publicaron hasta que fue redescubierto en Inglaterra, Suecia y Yugoeslavia, independientemente (1957) [1]. El proceso se usa para obtener ^{10}B destinado a contadores de neutrones, por ejemplo. Una columna típica contiene unos 40 platos teóricos y enriquece ^{10}B en cantidades del orden de kilogramos, desde su contenido natural del 20%, hasta el 96% [1*c*].

Otros ejemplos de destilación con intercambio son la disociación del acetato de trimetilamina y la del carbamato amónico acuoso. Las reacciones son:

$$CH_3.COONH(CH_3)_3 \rightleftharpoons N(CH_3)_3 + CH_3COOH$$

($\varepsilon = 0{,}012$ para el enriquecimiento en ^{15}N)

$$NH_2.COONH_4(aq) \rightleftharpoons CO_2 + 2NH_3$$

En el segundo ejemplo hay enriquecimiento en ^{15}N ($\varepsilon = 0{,}015 - 0{,}020$) y en ^{14}C a la vez. En el caso de la destilación con intercambio del complejo BF_3-éter metílico, además del enriquecimiento en ^{10}B hay uno pequeño en ^{18}O, debido al intercambio del compuesto líquido con el éter gaseoso ($\varepsilon = 0{,}012$).

EL INTERCAMBIO QUIMICO (GAS-LIQUIDO)

Este método fue sugerido (1935) por Urey y Greiff y condujo al primer enriquecimiento «en gran escala» del ^{15}N valiéndose de la separación que hay cuando el NH_3 intercambia con sales amónicas ($\alpha = 1{,}031$). Sin embargo, el ejemplo más elegante es el intercambio de HNO_3 con NO [1*d*] utilizado por Taylor y Spindel (1955) que también tiene un factor de separación considerablemente mayor. Con este proceso se ha proyectado [4] una instalación en cascada con dos columnas de 4,5 m en serie, con 300 platos teóricos que producen al día 0,4 g de ^{15}N con 99,8% de pureza, desde su concentración natural (0,36%). Un aspecto interesante del proyecto es su completo automatismo; no necesita emplear bombas ni dispositivos electrónicos. Cada columna tiene un refluidor en el fondo donde el ácido nítrico se convierte en óxido nítrico mediante dióxido de azufre, y otro en la parte superior donde el óxido

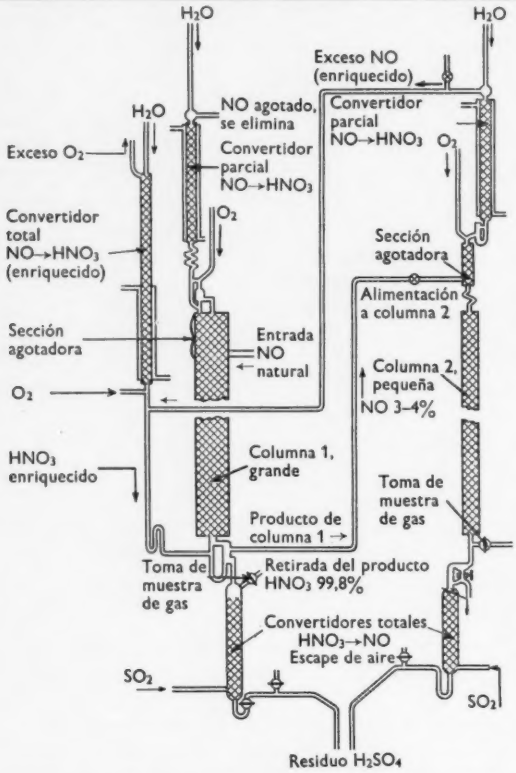


FIGURA 3 – *Esquema de la instalación de Gowland y Johns para aislar isótopos del nitrógeno; tiene un particular interés porque utiliza dos columnas en serie sin emplear bombas.*

nítrico se reconvierte en ácido nítrico por combinación con oxígeno y agua. La razón de reflujo en la parte superior de las columnas puede ajustarse simplemente regulando el aporte de oxígeno. Como todo el transporte entre columnas tiene lugar por la fase gaseosa bajo la presión de ésta (Fig. 3), no se necesitan bombas ni para los líquidos ni para los gases, lo que aumenta mucho la seguridad en el funcionamiento. El óxido nítrico sobrante en la cabeza de la segunda columna se transforma por completo en ácido nítrico en un convertidor adicional y este material todavía enriquecido se devuelve a la primera columna.

Otras reacciones de intercambio químico con factores de separación útiles (a 25° C) son

$$S^{16}O_2 + 2H_2{}^{18}O \rightleftharpoons S^{18}O_2 + 2H_2{}^{16}O \qquad (\alpha = 1{,}020)$$
$$C^{16}O_2 + 2H_2{}^{18}O \rightleftharpoons C^{18}O_2 + 2H_2{}^{16}O \qquad (\alpha = 1{,}044)$$
$$^{13}CO_2 + H^{12}CO_3{}^- \rightleftharpoons {}^{12}CO_2 + H^{13}CO_3{}^- \qquad (\alpha = 1{,}012)$$
$$H^{13}CN + {}^{12}CN^- \rightleftharpoons H^{12}CN + {}^{13}CN^- \qquad (\alpha = 1{,}012)$$
$$^{34}SO_2 + H^{32}SO_3{}^- \rightleftharpoons {}^{32}SO_2 + H^{34}SO_3{}^- \qquad (\alpha = 1{,}019)$$
$$^{36}SO_2 + H^{32}SO_3{}^- \rightleftharpoons {}^{32}SO_2 + H^{36}SO_3{}^- \qquad (\alpha = 1{,}040)$$

El proyecto de las instalaciones de intercambio químico es muy similar al de las columnas de destilación; los cuerpos de relleno son generalmente «Helipak» y anillos Dixon, que dan las menores alturas de plato teórico que pueden lograrse. Sin embargo, estas alturas nunca llegan a los pequeños valores obtenidos en la misma columna para un proceso de destilación. La razón es que el transporte por difusión en la fase líquida (ordinariamente una disolución acuosa de la molécula que intercambia) es aproximadamente un orden de magnitud menor que en un líquido puro; también el intercambio químico dista a menudo de ser instantáneo.

EL INTERCAMBIO QUIMICO ENTRE DOS FASES LIQUIDAS

Son relativamente escasos los procesos de separación de isótopos que suponen equilibrio entre dos fases líquidas inmiscibles. Los intentos del autor para separar los isótopos del litio por intercambio entre una solución acuosa concentrada y otra en fosfato de tributilo, no mostraron un factor de separación apreciable. Lewis y McDonald han investigado con amalgama de litio y soluciones de cloruro de litio en etanol absoluto, y con soluciones de bromuro de litio con una mezcla de alcohol y dioxano. En la base de la columna se produce el reflujo tratando la amalgama de litio con ácido clorhídrico alcohólico, pasando el litio cuantitativamente a una solución orgánica neutra. Con una columna de vidrio de 18 m se alteró la razón $^7Li/^6Li$ desde 11,6 en la parte superior (alimentación) hasta 5,5; sus datos no permiten calcular el factor de separación por etapa [5]. Sin embargo, Perret, Rozaud y Saito [6] dan después 1,05 como tal factor para amalgama de litio y solución de bromuro de litio en dimetilformamida; los valores de α para otros disolventes orgánicos cabe sean muy parecidos.

EL INTERCAMBIO QUIMICO A DOS TEMPERATURAS

En las destilaciones o en los intercambios descritos se podía conseguir el reflujo o por condensación o por simple mecanismo químico. Pero en varios intercambios útiles para enriquecimiento de isótopos no son posibles tales sencillos procesos de reflujo. Un caso típico es

$$HOH + HSD \rightleftharpoons HOD + HSH$$

que necesita la conversión total del hidrógeno de H_2S y de H_2O, y al revés, en ambos extremos de la columna.

FIGURA 4 – *Los anillos de tela metálica Lessing o Dixon son algunos de los cuerpos de relleno más eficaces para columnas de laboratorio o de pequeña producción.*

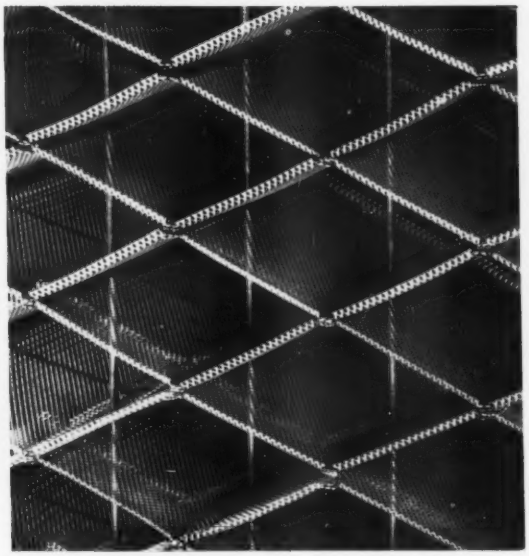


FIGURA 5 – *El «Spraypak» es uno de los materiales de relleno más eficaces en facilitar el contacto entre líquido y gases, para columnas de gran producción.*

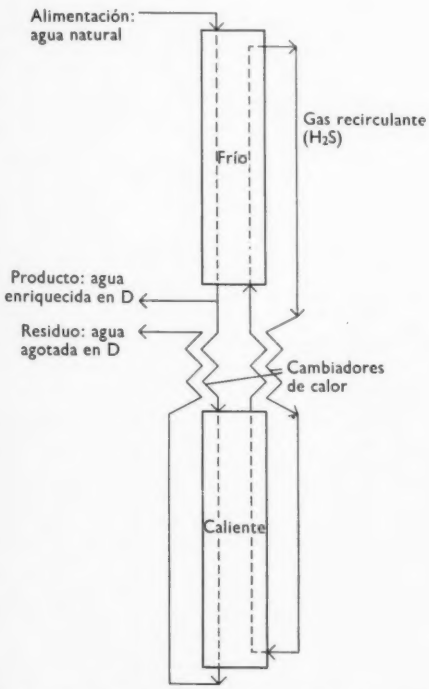


FIGURA 6 – *Representación esquemática del proceso de intercambio químico a dos temperaturas, para los casos donde no es practicable la transformación de una especie química en otra en el extremo de reflujo de la columna.*

En estos casos el reflujo puede proporcionarlo otra columna que funcione a mayor temperatura (con el correspondiente valor menor de α) que de el H_2S enriquecido; éste introduce contra la corriente de H_2O dentro del extremo enriquecedor de la columna «fría» (Fig. 6). Puede imaginarse un esquema simplificado en el que se alimente agua con su contenido natural de D_2O (0,0145%) en la cabeza de la columna fría, que a 30° C tiene un poder de separación efectivo $\alpha = 2{,}27$; el residuo, con menor contenido en D_2O se retira de la base de la columna caliente, que a 130° C, por ejemplo, tiene un factor de separación efectivo de $\alpha = 1{,}65$. Las constantes de equilibrio reales son algo distintas pero el factor de separación se modifica por la presencia de vapor en la fase gaseosa, sobre todo H_2S, y por la solubilidad del H_2S en agua. El producto enriquecido se retira en forma de agua, entre las dos columnas. En la práctica se asocian en serie varios sistemas de dos temperaturas, y el residuo agotado del segundo se devuelve al primero. En general se obtiene por este método un producto que tiene el 10–20% de D_2O y luego se concentra por electrólisis o por destilación.

Este procedimiento, patentado por Spevack [7] (aunque propuesto independientemente por Rideal y por Harteck y Suess), fue ideado en principio para producir deuterio en la mayor escala destinado a reactores nucleares. Consume poca energía, necesaria principalmente para la

potencia de bombeo para la circulación del gas y del líquido y el calor para humedecer el chorro de gas cuando penetra en la columna caliente. La energía necesaria para calentar el gas y el líquido antes de pasar a la columna caliente se recupera en gran parte por intercambio calorífico con estos fluidos cuando abandonan la columna caliente. La temperatura de la torre fría debe ser sobre 29° C, pues de otro modo el H_2S forma un hidrato sólido; la de la torre caliente debe ser inferior a 130° C, pues si no la proporción de vapor en la fase de H_2S llegaría a ser demasiado grande, lo que influiría adversamente sobre el proceso de separación y el consumo de energía.

Se han propuesto procesos parecidos de dos temperaturas basados en el intercambio de H_2S con H_2O, líquidos ambos; para el intercambio de hidrógeno gaseoso con NH_3 líquido con amida potásica como catalizador [1*e*]; y para el intercambio de hidrógeno gaseoso con agua empleando suspensiones de platino y carbón como catalizadores del intercambio.

Aunque parezca que los procesos de dos temperaturas podrían tener un vasto campo de aplicaciones, hay en realidad graves limitaciones prácticas. La razón de los flujos másicos en los ciclos de gas y de líquido deben estar entre los valores de α a las dos temperaturas, y para todos salvo los mayores factores de separación, esto supone un difícil dominio de la razón de flujos.

LAS SEPARACIONES CROMATOGRAFICAS

Aunque los intercambios en contracorriente con dos fases flúidas (gas y líquido, o líquido y líquido) han encontrado aplicación en la mayor escala, el uso de procesos cromatográficos, esto es, de intercambiadores que suponen una fase sólida y otra fluida no ha llevado a aplicaciones técnicas en gran escala, pese a que de su estudio han resultado varias investigaciones interesantes.

A priori podría creerse que los métodos cromatográficos serían muy útiles para las separaciones isotópicas debido a las pequeñas alturas de platos (<1 mm) que pueden conseguirse en tales columnas. Esto haría posible sin gran gasto trabajar con 10 000 o más platos teóricos en una sola columna, comparado con los 500 que pueden proporcionar las mejores columnas de destilación. Pero esta ventaja es más que compensada por la lentitud extremada con que se alcanza el equilibrio para el intercambio entre una fase sólida y una líquida, y por el muy escaso número de intercambios entre gas y sólido que tienen un factor de separación aceptable.

Las reacciones que suponen una fase líquida pueden subdividirse en dos grupos:

1. Cromatografía con intercambio directo de ion entre una solución de electrolito y un cambiador de iones sólido. Aquí los factores de separación que se observan son todos sumamente pequeños. Incluso para el caso más favorable del $^6Li/^7Li$, los valores observados para ε están entre 0,0010 y 0,0038, aumentando con el grado de cruzamiento de enlaces en el intercambiador [8]. Al pasar a iones más pesados, como el sodio, se han observado valores en torno a 0,0001 [9] para el intercambio de ^{22}Na y ^{24}Na.
2. Intercambio entre los iones del intercambiador y un compuesto relacionado en la fase acuosa. El ejemplo mejor conocido es el enriquecimiento de ^{15}N obtenido por Spedding, Powell y Svec [10] mediante el equilibrio

$$NH_4^+ \text{ (intercambiador)} \overset{\varepsilon=0{,}026}{\rightleftharpoons} NH_4OH(aq)$$

Tras recircular una zona de NH_4^+ por una serie de columnas de 3 m, de modo que recorra un total superior a 90 m, consiguieron una pequeña cantidad de material enriquecido con el 45% de ^{15}N, a partir de otro con la relación natural entre $^{15}N/^{14}N = 0{,}0036$.

La reacción de intercambio causante de la separación isotópica no es en este caso el intercambio de iones (que tiene un factor de separación despreciable) sino el equilibrio en solución acuosa

$$[NH_4^+](aq) + [OH]^- \rightleftharpoons NH_4OH$$

El papel del intercambiador es simplemente retener los iones mientras progresa la solución que contiene el hidróxido amónico sin disociar.

Parecido efecto han observado investigadores japoneses [11] al pasar ácido bórico por cambiador de anión. Aquí el equilibrio actuante es la primera disociación del ácido bórico en la solución acuosa:

$$B(OH)_3 + H_2O \rightleftharpoons B(OH)_4^- + H^+$$

Para el intercambio $^{10}B/^{11}B$ se halla un valor de ε entre 0,010 y 0,016. También el intercambiador sirve solamente para separar las moléculas iónicas y no iónicas entre sí y de tal forma causar el efecto de varias etapas.

En el caso de la cromatografía de gases, los factores de separación difieren mucho según la naturaleza del proceso de adsorción que intervenga. Con adsorción física se han observado únicamente valores pequeños de ε: por ejemplo

0,0020 para los isótopos del neón sobre columnas de carbón a la temperatura del nitrógeno líquido [12]. No obstante, el caso, no ensayado, de $^3He/^4He$ podría quizá dar buena separación, en tales columnas y a la temperatura del hidrógeno líquido, por la gran relación de masas de los isótopos y la baja temperatura de separación.

Si interviene la adsorción química, como en las separaciones por cromatografía de gases para los isótopos del hidrógeno, sobre columnas de paladio, hechas por Glueckauf y Kitt [1*f*], hay factores de separación muy grandes: $\alpha = 1{,}8$ para H – D y $\alpha = 2{,}6$ para H – T. Es rápido el equilibrio local y por ello se pueden realizar separaciones prontas y eficaces; con cantidades importantes de material se consigue fácilmente un factor de enriquecimiento de 100.

Si interesa solamente el isótopo más pesado del hidrógeno, basta con llenar de un tercio a un medio la columna con la mezcla isotópica, y desplazar la banda por ella, bien con adiciones de hidrógeno ordinario o por calentamiento progresivo desde el final de la columna. Como el deuterio o el tritio son adsorbidos con menos facilidad sobre el paladio que el hidrógeno, forman una zona frontal de gran pureza que puede fácilmente aislarse del resto; la Fig. 7 muestra la nitidez de la separación.

Por desgracia, el método no es económico para una producción de deuterio en gran escala, donde el factor dominante es el consumo de energía y no la simplicidad. Esto se debe en parte al gran calor de adsorción del hidrógeno sobre el paladio, calor que ha de aportarse para la regeneración de la columna. Un factor adicional es el empleo de hidrógeno gaseoso como sustancia de partida, mucho más caro que el agua empleada en el

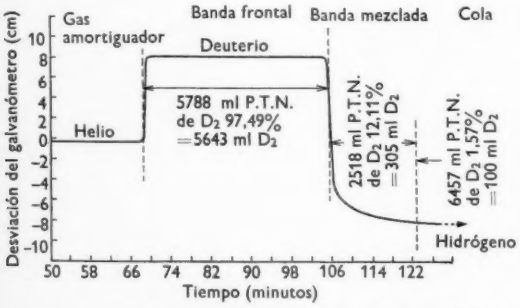


FIGURA 7 – *La separación cromatográfica de los isótopos del hidrógeno sobre columnas de paladio. Se representan las desviaciones producidas en el catarómetro por el gas eluído: primero el gas amortiguador helio primitivamente en la columna, luego la fracción con deuterio seguida por la fracción con hidrógeno.*

proceso con H_2S antes descrito, pero tratándose de reconcentrar cantidades del orden del litro de deuterio diluido o mezclas con tritio, no tiene rival el método y es mucho más económico que los métodos de difusión térmica, por ejemplo.

CONCLUSION

Así como las propiedades químicas de los diversos elementos varían ampliamente, también varían los métodos químicos adecuados para resolverlos en sus isótopos. La Tabla III es una breve revisión de los métodos más prometedores que pueden emplearse para los isótopos más livianos, salvo el hidrógeno; la mayoría de ellos han sido comprobados en el laboratorio o en escala considerable. En el caso de los isótopos del hidrógeno los factores de separación son tan grandes que caben diversos métodos; la elección dependerá de las cantidades deseadas, de la disponibilidad de la sustancia de partida (H_2, NH_3 ó H_2O) y de algunos factores económicos.

Más allá del peso atómico 40, la separación química de los isótopos es, al menos hasta ahora,

TABLA III

Elemento	Método más prometedor para separar sus isótopos	α
$^3He/^4He$	Cromatografía gaseosa en pequeña escala sobre carbón enfriado con hidrógeno líquido	Desconocido
$^6Li/^7Li$	Intercambio químico líquido-líquido entre amalgama de Li y solución de dimetilformamida en LiBr	1,05
$^{10}B/^{11}B$	Destilación con intercambio $BF_3 \rightleftharpoons BF_3(C_2H_5)_2O$	1,027
$^{13}C/^{12}C$	Destilación del CO	1,011
	Intercambio químico entre HCN y CN^- (gas y líquido) ..	1,012
$^{15}N/^{14}N$	Intercambio químico entre $NO \rightleftharpoons HNO_3$ (gas y líquido) ..	1,055
$^{18}O/^{16}O$	Destilación del NO	1,046
	o del H_2O	1,006
	o del CO	1,0076
$^{22}Ne/^{20}Ne$	Destilación del Ne	1,044
$^{34}S/^{32}S$	Intercambio químico entre SO_2	1,019
$^{36}S/^{32}S$	y HSO_3^- (gas y líquido) ..	1,040
$^{36}A/^{40}A$	Destilación	1,006

inferior a los métodos físicos tales como el electromagnético y el de difusión. Esto se debe no sólo a la pequeñez de los factores de separación química, que disminuyen rápidamente con los números atómicos crecientes, sino a la falta de pares de compuestos en los que, además de diferir suficientemente en enlace químico, se establezca con rapidez el equilibrio entre ellos; esta falta se nota particularmente en el caso de los elementos metálicos.

REFERENCIAS

[1a] JOHNS, T. F. «Proceedings of the International Symposium on Isotope Separation». North Holland Publishing Co., Amsterdam, pág. 174. 1958.

[1b] LONDON, H. *Ibid.*, pág. 319.

[1c] MCILROY, R. W. y PUMMERY, F. C. W. *Ibid.*, pág. 178.

[1d] TAYLOR, T. I. y SPINDEL, W. *Ibid.*, pág. 158.

[1e] BIGELEISEN, J. *Ibid.*, pág. 121.

[1f] GLUECKAUF, E. y KITT, G. P. *Ibid.*, pág. 210.

[1g] DOSTROVSKY, I. y RAVIV, A. *Ibid.*, pág. 336.

[2] KUHN, W., BAERTSCHI, P. y THURKAUF, M. *Chimia*, **8**, 109, 145, 1954.

[3] UREY, H. C. y WASHBURN, E. W. *Proc. Nat. Acad. Sci., Wash.*, **18**, 496, 1932.

[4] GOWLAND, L. y JOHNS, T. F. AERE C/R 2629, Harwell. 1958.

[5] LEWIS, G. M. y MCDONALD, R. T. *J. Amer. chem. Soc.*, **58**, 2519, 1936.

[6] PERRET, L., ROZAUD, L. y SAITO, E. Commissariat à l'Energie Atomique, Informe No. 1029, 1958.

[7] SPEVACK, J. S. Columbia University Rep. A-393, 1942. También MDDC-891, 1947.

[8] LEE, D. A. y BEGUN, G. M. *J. Amer. chem. Soc.*, **81**, 2332, 1959.

[9] BETTS, R. H., HARRIS, W. E. y STEVENSON, M. D. *Canad. J. Chem.*, **34**, 65, 1956.

[10] SPEDDING, F. H., POWELL, J. E. y SVEC, H. J. *J. Amer. chem. Soc.*, **77**, 6125, 1955.

[11] YONEDA, Y., USHIJIMA, T. y MAKISHIMA, S. *J. phys. Chem.*, **63**, 2057, 1959.

[12] GLUECKAUF, E., BARKER, R. H. y KITT, G. P. *Faraday Soc. Disc.*, **7**, 199, 1949.

Revista de libros

FISICA

A Physics Anthology (Edición dirigida por N. Clarke). VIII + 323 págs. Publicada para el Institute of Physics por Chapman and Hall Ltd., Londres; Reinhold Publishing Corporation, Nueva York. 1960. 35s.

Este libro contiene veintidós artículos publicados en el *Bulletin* del *Institute of Physics*, la mayor parte de ellos basados en charlas y conferencias en reuniones organizadas por dicho Instituto. La parte final es un informe de una discusión sobre el tema de la ética y el hombre de ciencia, que tuvo lugar en Mánchester en 1956. La falta de espacio no nos permite siquiera dar una lista de las distinguidas personalidades que cooperan en esta obra ni de los temas por ellas tratados, los cuales cubren extenso terreno. Cierto número de colaboraciones tratan de la física como factor educacional y de la educación de los físicos; otras estudian diversos aspectos de la física en sus relaciones con la industria; por último, otras tratan de la historia de esta rama, especialmente dos artículos sobre Newton y Max Planck. Todos ellos son obra de autoridades en la materia, algunos de reputación mundial, con excelentes facultades de exposición. Por lo tanto, esta colección debe tener buen éxito de público.

Debemos mencionar que el libro se inicia con una aportación de Sir Cyril Hinshelwood sobre «la física y las demás ciencias», escrita con su característica concisión, amenidad y penetración. En ella encontramos la frase: «Lo que cualquiera pueda creer sobre el fin último de la existencia está muy poco influido por su posición en el universo espacio-temporal», lo que le conduce a afirmar que la relatividad no tiene nada que ver con la religión. Sin embargo, el Canónigo Raven, en un artículo sobre «El impacto de la física sobre la ciencia y la religión» parece implicar que la teoría de la relatividad de Einstein ha ejercido profunda influencia sobre las nociones religiosas y filosóficas. Quizás convenga escuchar a Einstein sobre este punto. Según fuentes autorizadas, el Arzobispo de Canterbury preguntó en una ocasión al gran sabio si su teoría tenía alguna aplicación en la religión; la respuesta fue un abrupto «Ninguna». Pero también es posible que los científicos no sepan vislumbrar las consecuencias de sus propias nociones.

E. N. DA C. ANDRADE

ZIMAN, J. M.: *Electrons and Phonons; The Theory of Transport Phenomena in Solids.* XIV + 554 págs. Clarendon Press, Oxford; Oxford University Press, Londres. 1960. 84s.

El paso de la electricidad a través de un sólido se efectúa, en la mayoría de los casos, por medio de los electrones que se mueven a lo largo del sólido. El calor se transmite principalmente por medio de diminutas vibraciones mecánicas; en los sólidos electroconductores el calor también está transmitido por los electrones. Para la adecuada comprensión de esos fenómenos es necesaria la teoría cuántica, una de cuyas consecuencias principales es que la energía vibracional se produce en cuantos. Los cuantos se comportan de tal manera que es conveniente aplicarles el lenguaje propio de las partículas y darles un nombre propio: fonones. Así, la teoría de la conducción eléctrica y térmica trata principalmente del comportamiento de electrones y fonones que, como tienen muchas características comunes, su estudio unificado ofrece valiosas enseñanzas.

En este libro, el Dr. Ziman se propone explicar los fenómenos de transporte en los sólidos, de manera que se subrayen los principios físicos. No

pretende que la teoría tenga en todos sus aspectos un rigor absoluto. Por el contrario, presenta como tales los puntos dudosos, de modo que el lector sepa apreciar más claramente los fundamentos sobre los que se ha construido tan complicado edificio. Trata todos los aspectos principales de la conducción en los sólidos y merece la gratitud del lector por haber recogido así en un solo volumen material muy disperso. M. H. L. PRYCE

QUIMICA

EMELÉUS, H. J. y ANDERSON, J. S.: *Modern Aspects of Inorganic Chemistry* (3ª edición). XI + 611 págs. Routledge and Kegan Paul Ltd., Londres. 1960. 35s.

El interés de esta edición revisada — en gran parte modificada y transformada — se centra, como es natural, en los cambios introducidos por los autores. La labor de selección no ha sido fácil, debido a los rápidos progresos de la química orgánica durante la última década.

El aumento de tamaño es pequeño — un 10% — lo que nos lleva a felicitar a los autores por la selección de lo omitido y lo incluido. Bajo el subtítulo «Complejos de enlace-π» se encuentra un estudio muy al día de los carbonilos, nitrosilos, complejos ciclopentadiénicos y complejos metalo-aromáticos en general. El tema, en rápido desarrollo, de los mecanismos de las reacciones inorgánicas recibe plena atención. El estudio de la moderna teoría de la valencia se ha extendido para incluir la teoría del campo de ligandos y algún material más sobre el enfoque molecular-orbital. El estudio de los enlaces en los complejos metálicos recoje los avances más recientes.

Este libro debe ser utilizado por todo profesor de química y servirá para estimular el moderno enfoque físico de esta materia. Debiera ser también obligatoria su lectura a todo estudiante: no podemos encontrar elogio mayor que decir que es tan bueno como antes, pero más al día. R. S. NYHOLM

Advances in Organic Chemistry: Methods and Results, Vol. I. (Edición preparada por R. A. Raphael, E. C. Taylor y H. Wynberg.) IX + 387 págs. Interscience Publishers Inc., Nueva York; Interscience Publishers Ltd., Londres. 1960. 90s.

Este volumen es el primero de una nueva serie que, según la introducción general, recojerá «artículos que suministren una valoración crítica de nuevos aspectos que se presten a mayor desarrollo y de extensiones noveles de métodos ya bien establecidos». Su contenido es: síntesis por electrólisis de Kolbe (B. C. L. Weedon); el ácido fosfórico como reactivo en química orgánica (F. Uhlig y H. R. Snyder); la reacción de Wittig (S. Trippett); los métodos de hidroxilación (F. D. Gunstone); la degradación selectiva de las proteínas (E. O. P. Thompson); y la dispersión rotatoria óptica y el estudio de las estructuras orgánicas (W. Klyne).

Aunque la mayoría de estos temas han sido ya objeto de estudio en los últimos cinco años, la amplitud y tratamiento de los cuatro primeros difieren de los de trabajos anteriores y son comparables a los que aparecen en *Angewandte Chemie* e incluyen ejemplos típicos de procedimientos experimentales. Los dos últimos artículos, que ocupan más de la mitad del libro, describen los grandes progresos realizados en sus respectivas ramas durante los años recientes. Esta nueva serie merece nuestro elogio y recomendación a todo químico orgánico.

J. F. W. MCOMIE

GEOGRAFIA

CHAPMAN, V. J.: *Salt Marshes and Salt Deserts of the World.* XVI + 392 págs. Leonard Hill (Books) Ltd., Londres; Interscience Publishers Inc., Nueva York. 1960. 95s.

El Profesor Chapman ha conseguido integrar numerosos estudios de importancia sobre la fisiografía y vegetación de marismas y desiertos alcalinos. Los biotopos salinos, con excepción de los cenagales cubiertos de mangles, aparecen aquí estudiados en escala mundial.

El autor divide la materia en tres partes: la primera trata de las características, formación y factores ecológicos de marismas y desiertos salinos continentales; la segunda, de su vegetación; la tercera, de la biología y fisiología de los halófitos. Numerosas tablas resumen las relaciones sucesionales de la vegetación, quizás algo dogmáticamente en ciertos casos ya que dichas relaciones son conjeturales en algunas regiones. El libro contiene también interesantes secciones sobre el análisis de las formas vitales y las relaciones geográficas de la vegetación marismeña. Se subraya el estudio de las comunidades algales.

Esta monografía será útil como fuente de información y como estímulo para quienes se ocupen de la vegetación marismeña. Está abundantemente ilustrada y suficientemente documentada, aunque una mayor extensión de los pies de figura y de las explicaciones de las tablas hubiera sido de gran utilidad al lector. Las fotografías son muy valiosas. A. J. WILLIS

GEOLOGIA

RUSSELL, R. D. y FARQUHAR, R. M.: *Lead Isotopes in Geology.* VIII + 243 págs. Interscience Publishers Inc., Nueva York; Interscience Publishers Ltd., Londres. 1960. 65s.

Hoy sabemos que es posible determinar la edad de la corteza terrestre con cierta precisión gracias a la constitución isotópica del plomo de las galenas y otros minerales; en algunos casos favorables se puede establecer la edad aproximada de los depósitos de mineral de plomo. También es posible ayudar a desenmarañar la complicada evolución de los minerales que contienen plomos anómalos, esto es: los que presentan exceso o defecto de plomo radiogénico con relación a su edad. Los autores de esta utilísima monografía merecen nuestra felicitación por haber reunido de forma tan manejable y satisfactoria todos los datos de que hoy se dispone — y que hasta ahora estaban diseminados en múltiples publicaciones y muchos de ellos inéditos — sobre una cuestión de importantes aplicaciones en geología y geoquímica.

Después de una introducción general, los capítulos tratan sucesivamente de la metodología, de la edad de la Tierra, de la datación de galenas, de los plomos anómalos, de ciertos casos particulares, de las extensiones del modelo de Holmes-Houtermans, y de los métodos basados en el plomo-uranio-torio. Se incluyen tablas de datos y las funciones necesarias para los diversos cálculos. Los autores se inclinan en favor de la hipótesis de que el plomo contenido en los minerales se ha originado en el manto terrestre y ha sido arrastrado a la superficie por los volcanes durante el proceso de formación continental; pero también reconocen las objeciones que pueden hacerse a esta doctrina y al «modelo» en ella basado y presentan con ecuanimidad todos los demás modelos hasta ahora propuestos. Hasta ahora nadie ha prestado la debida atención al mezclado y diferenciación resultantes de la erosión, la sedimentación geosinclinal y la subsiguiente granitización. Característica especialmente valiosa de esta publicación es su apéndice, que

comprende varios centenares de análisis isotópicos de plomos corrientes.

A. HOLMES

BIOLOGIA

ROSS ASHBY, W.: *Design for a Brain* (2ª edición, revisada). IX+286 págs. Chapman and Hall Ltd., Londres. 1960. 42s.

El Dr. Ashby ha añadido un subtítulo a la segunda edición de su obra: «El origen de la conducta adaptativa». Para un biólogo, el término «origen» puede parecer algo ambicioso, ya que el autor apenas trata de la variedad de organismos. Lo que sí hace es estudiar la lógica de las máquinas de «ensayo y error», tema que evidentemente tiene gran interés biológico. La originalidad de su estudio es que en él trata de mostrar que el procedimiento de «ensayo y error» funcionando a través de una serie de «funciones graduales» hace posibles hasta las más complejas actividades del sistema nervioso. En realidad Ashby supone que el proceso de «ensayo y error» es el único capaz de derivar del mundo circundante toda la información necesaria para el mantenimiento de la homeóstasis o constancia de las condiciones internas que permiten la vida del organismo. Sin embargo, no estudia muy detenidamente la verdadera causa de la variedad que él mismo postula, aunque sugiere que las diversas gradaciones pueden hallarse entre sucesos no especificados, en el nivel molecular, en las neuronas.

No todos los biólogos aceptarán fácilmente las pruebas que aduce el Dr. Ashby, aunque quizás los más reacios se beneficiarían del esfuerzo necesario. Los problemas biológicos entrañan muchos conceptos que es muy difícil precisar; uno de ellos es la «adaptación». Los ejemplos que el Dr. Ashby presenta de sus nociones están tomados, no de organismos vivos, sino del modelo que él mismo ha construido: el Homeostato. Es lástima que las curvas que presenta, derivadas del funcionamiento de dicha máquina, sean las mismas en esta segunda edición que en la primera: en los siete años transcurridos Ashby no parece haber obtenido nuevos datos. Es necesario disponer de un análogo que compute continuamente los parámetros cuyo conocimiento nos es preciso; es decir, que funcione exactamente como un cerebro. Mientras tanto, los análisis del Dr. Ashby pueden estimularnos a considerar los mecanismos neurales con preconcepciones menos rígidas respecto a lo que sean las variables verdaderamente significativas.

J. Z. YOUNG

Journal of Reproduction and Fertility, Vol. I, Nº 1, Febrero 1960. Dirigido por C. K. Austin. 120 págs. Blackwell Scientific Publications, Oxford. Número trimestral: 20s.; suscripción anual: 70s.

Los patrocinadores de este *Journal of Reproduction and Fertility* merecen nuestra felicitación por el primer número publicado, el cual contiene trabajos muy interesantes. Se encuentra en él un importante artículo sobre los fosfolípidos en el semen de los mamíferos, obra de Hartree y Mann. Hasta ahora este tema estaba bastante confuso y la clarificación que aportan los autores es por tanto de gran interés. El trabajo de Beatty sobre la capacidad de fertilización del semen obtenido de diferentes conejos es también de valor, tanto más cuanto que es una continuación y aclaración de las investigaciones rusa sobre la inseminación heterospérmica. El artículo de Bruce sobre el efecto inhibitorio que sobre la concepción ejercen ratones machos extraños tiene asimismo desusado interés. Gracias a esta revista, clínicos e investigadores en cuestiones de reproducción y gametología pueden ahora leer los trabajos referentes a su especialidad en un solo volumen, en vez de tener que consultar diez o más de ellos.

LORD ROTHSCHILD

HARRIS, H.: *Human Biochemical Genetics*. VIII+310 págs. Cambridge University Press, London, 1959. 37s. 6d.

En este libro el Dr. Harris nos presenta de manera admirable los notables progresos que en la genética bioquímica humana se han producido desde la publicación de la segunda edición (1923) de la obra de Garrod *Inborn Errors of Metabolism*. De modo coherente y ordenado ha condensado todos los datos que se hallan diseminados en una extensa literatura. Comienza con los útiles capítulos en los que, además de subrayar la importancia de la noción establecida por Garrod del «defecto bioquímico», reitera las ideas básicas de la genética y suministra toda la información suplementaria a la genética de las poblaciones. A continuación estudia, principalmente desde un punto de vista bioquímico, las variaciones normales y anormales en el metabolismo de los aminoácidos, hidratos de carbono y otras sustancias y de la constitución de la sangre. Los dos capítulos sobre las hemoglobinas humanas y las sustancias determinantes de los grupos sanguíneos son notables por su claridad. Excepto en adecuadas ocasiones evita todos los aspectos especulativos o provocativos de la materia así como la mención de otras especies sino la humana, aunque indica cuidadosamente la debilidad de las doctrinas admitidas y señala los problemas aún por resolver. Con tal enfoque y una gran habilidad de exposición clara y concisa, el Dr. Harris ha producido un libro muy útil que recoje las más recientes informaciones dentro de lo que permiten los necesarios retrasos en la publicación.

J. R. P. O'BRIEN

BOTANICA

Plant Pathology, Vol. II, *The Pathogen*. (Dirigido por J G. Horsfall y A. E. Diamond.) XIV+715 págs. Academic Press Inc., Nueva York. 1960. $22.

Este volumen, segundo de una serie de tres, estudia los antecedentes de la enfermedad, cómo se origina ésta y, en breve, cuál sea la causa de la enfermedad. Los capítulos estudian, entre otras cosas, los patógenos; la naturaleza, origen y evolución del parasitismo; la multiplicación e inactivación de los virus; la reproducción de bacterias, actinomicetos y hongos; la germinación de las esporas; la destrucción de barreras de defensa por medios mecánicos y químicos; la fungitoxicidad y la química de los fungicidas; los nematocidas.

Cada autor es un especialista en su propio campo, pero todos escriben con claridad. Es imposible que un patólogo vegetal esté hoy al corriente de todos los progresos que se realizan en los distintos sectores de esta materia, pero gracias a este libro podrá obtener un resumen bastante completo de algunos.

C. C. V. BATTS

The Biology of Weeds (Edición dirigida por J. L. Harper.) XV+256 págs. Blackwell Scientific Publications, Oxford. 1960. 42s.

En el presente volumen se recojen los trabajos presentados en un simposio organizado por la *British Ecological Society* en Oxford en 1959, reunión a la que asistieron especialistas en taxonomía, evolución, genética, fisiología y ecología de las plantas dañinas. Si bien es de especial interés para el ecologista, este libro también tendrá valor para el especialista en biología aplicada y el

investigador de productos yerbicidas.

Son muy diversos los temas tratados e incluyen contribuciones bien documentadas sobre la historia de las malas hierbas en la Gran Bretaña; la dormición de las semillas, la diseminación de los malas hierbas por los cultivos de grano, la competición entre las plantas, la ecología de las malas hierbas, la producción de toxinas por *Agropyron repens*, la comparación de las historias de la vida de *Cirisium arvense* y *Turrilago farfara*, y la germinación y establecimiento temprano de los llantenes. El libro contiene 24 trabajos y su introducción, obra del Dr. Harper, representa un conciso sumario del propósito y alcance de este simposio.

D. S. C. ERSKINE

FARMACOLOGIA

LEWIS, J. J.: *Introduction to Pharmacology.* XII+826 págs. E. & S. Livingstone Ltd., Edimburgo. 1960. 55s.

La farmacología es una materia difícil porque puede ser enfocada desde la química y desde la biología. En este libro el autor adopta el primer enfoque, con lo que para el químico resulta ésta una obra admirable. Como es natural, para el biólogo y por tanto para el estudiante de medicina es ya menos conveniente. La sección que trata del destino de los medicamentos después de su absorción y de los cambios químicos que sufren es interesante, informativa y concisa; pero, por otra parte, la que estudia las aminas simpatomiméticas y sus propiedades fisiológicas está hoy atrasada.

A lo largo de todo el libro se observa cómo se subraya el enfoque químico. Al describir los corticoesteroides el autor muestra gran entuasiasmo por los nuevos compuestos de reciente introducción, que revelan creciente potencia; sin embargo, no dice nada de la función de la aldoesterona, excepto su mención en una figura como minerocorticoide muy potente.

El libro está destinado a los estudiantes de medicina, pero nosotros tememos que sólo produzca gran entusiasmo en aquéllos que se interesan especialmente en la química.

J. H. BURN

Bentley and Driver's Textbook of Pharmaceutical Chemistry (7ª edición, revisada por J. E. Driver). IX+728 págs. Oxford University Press, Londres. 1960. 63s.

Durante los 35 años transcurridos desde la publicación de la primera edición de este libro, la profesión farmacéutica ha pasado de ser una actividad que pudiéramos llamar de artesanía, modificada por la introducción de ciertas disciplinas básicas, a una materia académica basada en la aplicación de ciencias básicas a las modernas técnicas farmacológicas. En este libro se intenta lo imposible: los límites del conocimiento farmacológico se han extendido tanto que serían necesarios varios volúmenes para cubrir todo su campo.

La nueva edición es muy superior a las anteriores y debemos decir que esa tarea imposible se ha realizado en parte. La Parte I estudia los métodos analíticos, pero algunos de sus capítulos son demasiado cortos. La Parte II, sobre la química inorgánica, introduce dos capítulos nuevos sobre los núcleos atómicos y la radiactividad y sobre la periodicidad y la valencia, que son todo lo buenos que pueden serlo teniendo en cuenta el espacio, pero que hubieran mejorado mucho si hubiese sido posible introducir en ellos los datos básicos necesarios para predecir los tipos de enlaces presentes en los compuestos inorgánicos. Es gran lástima que el estudio de los modernos aspectos de la química inorgánica no se haya extendido más.

Dos terceras partes del libro (Parte III) estudian la química orgánica, y esta sección ha sido muy revisada. Sin embargo, se ha prestado poca atención al papel fundamental de los efectos inductivo, mesomérico y tautomérico, y el resultado puede muy bien ser la confusión del estudiante.

Los datos factuales referentes a los compuestos orgánicos médicos están al día y muy bien presentados; hay pequeños detalles en los que discrepamos, pero no sería justo indicarlos en nuestra crítica. Por otra parte, es de lamentar que ciertas cuestiones fundamentales, tales como la ionización y los factores que influyen sobre la acción de los medicamentos, no estén tratados de manera alguna. Con todo, el libro formará valiosa adición a la biblioteca de todo lector interesado en la química farmacéutica.

W. H. LINNELL

HISTORIA DE LA CIENCIA

PARTINGTON, J. R.: *A History of Greek Fire and Gunpowder.* XVI+381 págs. W. Heffer & Sons Ltd., Cambridge. 1960. 70s.

Las aportaciones del Profesor Partington, que ha aplicado sus vastos conocimientos químicos a la historia de las armas de fuego en su sentido más lato, desde su aparición hasta los tiempos modernos a la ciencia y a la historia son espléndidas. Sus investigaciones van desde la Europa occidental hasta la China y en ellas ha hecho uso de todas las fuentes disponibles. Sus conclusiones sólo pueden ser discutidas por químicos especializados, pero los historiadores hallarán mucho que les interese en su convincente análisis del «Fuego griego» y de la parte que en él tenía el petróleo, así como en sus hipótesis sobre el papel que han representado los árabes en el desarrollo de la pólvora. Aparte de ciertos errores sin importancia en nombres y fechas y de algunas afirmaciones históricas cuestionables, la erudición de esta obra es tan amplia como profunda. Quizás puedan criticarse algunas de las traducciones usadas por el autor, quien se excede en sus escrúpulos de citar todos los comentarios posibles sobre sus fuentes originales. El tema tiene también ramificaciones económicas que convendría estudiar más detenidamente. Con todo, este libro permanecerá durante mucho tiempo como el compendio esencial de información sobre el uso de las sustancias químicas con fines bélicos durante el pasado.

S. RUNCIMAN

DE BEER, Sir Gavin: *The Sciences were never at War.* XV+279 págs. Thomas Nelson & Sons Ltd., Londres. 1960. 30s.

Hacia 1803, Edward Jenner escribió al *Institut de France* una carta que contenía la siguiente frase: «Las ciencias no están nunca en guerra». Sir Gavin de Beer, tan buen conocedor de la cultura francesa como de la inglesa, ha adaptado esas palabras al título de su libro, el cual estudia las relaciones entre los hombres de ciencia británicos y franceses desde los primeros días de la *Royal Society* hasta la caída de Napoleón. Durante ese período Francia e Inglaterra estuvieron en guerra durante un total de casi sesenta años; sin embargo, según demuestra el libro, siempre hubo libre y cordial comunicación entre los científicos, lo que culminó con la célebre visita de Sir Humphry Davy a Francia, por especial permiso del Emperador, en 1813, donde fue hospitalariamente festejado.

El libro consiste principalmente de cartas de famosos sabios, tales como Réaumur, Sir Joseph Banks, Delambre, Jenner y otros de menos nota, relativas a las relaciones científicas entre ambos países en tiempos de guerra, con los

comentarios adecuados para dar al lector suficiente conocimiento de las circunstancias del período. De especial interés es la época de las guerras napoleónicas, cuando los esfuerzos de Sir Joseph Banks tanto contribuyeron a mantener amistosas relaciones entre los estudiosos de los dos países. La mayor parte de las cartas y documentos son inéditos; todos los originales franceses van acompañados de una traducción al inglés. Este libro es una valiosa contribución a un aspecto de la historia de la ciencia que hasta ahora había recibido poca atención.

E. N. DA C. ANDRADE

BERRY, A. J.: *Henry Cavendish: His Life and Scientific Work*. 208 págs. Hutchinson, Londres. 1960. 35s.

Quizás sea éste el libro más acabado de Mr. Berry; en él realiza útil labor presentando en toda su amplitud los trabajos científicos — de extraordinaria precisión — de Cavendish, muchos de los cuales quedaron inéditos durante la vida del sabio. Su biografía, sin embargo, es poco más que una autopsia, como indica el subtítulo «Antepasados y características personales». A continuación se incluye un bosquejo de los sucesos contemporáneos como fondo de las investigaciones de Cavendish sobre química general, dinámica, electricidad, termología, meteorología y la composición del agua.

Aunque de utilidad y valor instructivo para el lector general y el científico, este libro no se puede recomendar sin reservas al estudiante de historia de la ciencia. En cierto lugar, su autor revela su íntima actitud diciendo de un tema que «solo tiene importancia histórica». ¿Qué debemos, por lo tanto, concluir de todo el resto? En el caso de Cavendish no es necesario exagerar, ni llamarle fundador del análisis del agua, ni modernizar su expresión; Cavendish no dió «una clara exposición del principio de las proporciones recíprocas». El libro está bien presentado, pero lleno de erratas.

F. W. GIBBS

ANDRADE, E. N. DA C.: *A Brief History of the Royal Society*. 28 págs. The Royal Society, Londres. 1960. 10s. 6d.

En este librito el Profesor Andrade relata la historia de la *Royal Society* desde sus reuniones «prehistóricas» en Londres en 1645 y su constitución legal el 28 de noviembre de 1660, pasando por las presidencias de Banks y de Davy, hasta el medio siglo — más conocido — de J. J. Thomson, Rutherford, Sherrington e Hinshelwood. Contiene además mucha información sobre las publicaciones de la Sociedad, sobre las funciones que ejercita, su independencia, sus relaciones internacionales, sus locales y tesoros y sobre los grandes hombres que a ella han pertenecido.

Relato éste muy vívido de todas las vicisitudes por que ha pasado la historia de la *Royal Society* a lo largo de tres siglos, al que se añaden numerosas informaciones de valor presentadas con sólido juicio y, a veces, sabrosos comentarios, todo ello basado en un profundo conocimiento del tema. Las reproducciones que contiene el libro son excelentes.

D. MCKIE

HARTLEY, Sir Harold (Compilador): *The Royal Society: its Origins and Founders*. 275 págs. The Royal Society, Londres. 1960. 35s.

El tricentenario de la *Royal Society* celebrado en julio de 1960 se distinguió por la reunión en Londres de representantes de los principales centros de investigación científica de todo el mundo. Ocasión tan memorable produjo sinfín de tributos, tanto orales como escritos, en los que se hacía mención autorizada a los orígenes e historia de dicha institución. Aunque tales tributos contienen elementos interesantes y valiosos para el historiador, es natural que tenga mayor enjundia una obra histórica compilada por la Sociedad misma; bien puede decirse que este libro hace justicia a una gran ocasión. Como su título indica no es una historia completa sino que, como es propio, se limita a los primeros tiempos de la institución. En un erudito y elegante capítulo introductorio Douglas McKie describe las circunstancias, tanto intelectuales como políticas, que condujeron a la famosa reunión en el *Gresham College* el 28 de noviembre de 1660, en la que se constituyó solemnemente la Sociedad.

Este capítulo va seguido de una serie de 22 bosquejos biográficos de los doce socios fundadores y de otros personajes que participaron en la creación de la Sociedad. En los casos en que se conoce se ha incluido un retrato de cada personalidad. Estos estudios contienen biografías de Charles II (E. S. de Beer), John Wallis (J. F. Scott), William Ball (A. Armitage), Henry Oldenburg (R. K. Bluhm) y Sir Robert Moray (D. C. Martin). En un breve epílogo el compilador describe las aportaciones de la *Royal Society* al conocimiento, a las ideas y a la lengua inglesa.

Este libro es no sólo espléndido memorial de una gran ocasión sino también interesante por su valor intrínseco. Es evidente que Sir Harold Hartley se ha esmerado en su preparación y que tanto él como sus colaboradores merecen nuestra alabanza por esta obra.

TREVOR I. WILLIAMS

DERRY, T. K. y WILLIAMS, Trevor I.: *A Short History of Technology from the Earliest Times to A.D. 1900*. XVIII + 782 págs. Clarendon Press, Oxford. 1960. 38s.

Durante los últimos años se ha revelado una tendencia a apartarse del concepto tradicional de la historia como presentación de sucesos políticos para dar más peso a los factores económicos y sociales. Los grandes acontecimientos de nuestro siglo han puesto de manifiesto la importancia de la tecnología pues es evidente que la vida humana se ha transformado radicalmente a consecuencia de la aplicación de la ciencia a la agricultura, la medicina, la producción de materiales y de energía y a las comunicaciones. También la guerra y la política han quedado marcadas por los avances tecnológicos.

Es por lo tanto importante la aparición de una historia de la tecnología en la que se presenta el rápido ritmo de tales cambios. Este libro procede de la misma fuente que la gran obra en cinco volúmenes aparecida hace dos años [*A History of Technology*, dirigido por C. Singer, E. J. Holmyard, A. R. Hall y T. I. Williams]. Su estilo atrayente y sus ilustraciones complacerán a todo lector, y la gran riqueza de información que contiene será de especial interés a todo estudiante de historia o de tecnología. En este libro se establecen firmemente las profundas relaciones que existen entre la tecnología y el curso general de la historia; pero a pesar de la importancia del tema la obra, que viene a satisfacer una verdadera necesidad, está llena encanto y detalles humanos y no peca nunca de pedantismo profético.

PATRICK LINSTEAD

Revistas resumidas de libros

(Estas revistas tienen carácter descriptivo más bien que crítico y sirven para dar una indicación general del contenido y naturaleza de las obras tratadas.)

VAJDA, S.: *An Introduction to Linear Programming and the Theory of Games.* 76 págs. John Wiley & Sons Inc., Nueva York; Methuen & Co. Ltd., Londres. 1960. 9s. 6d.

Durante la segunda guerra mundial se desarrolló lo que es hoy efectivamente una nueva rama de la ciencia: la investigación operacional. Este libro, que contiene el texto ampliado de una serie de lecciones, trata de las dos técnicas matemáticas fundamentales en estos estudios. Contiene capítulos sobre el problema de la transportación, el concepto de dualidad, los conceptos fundamentales de la teoría de los juegos, los juegos de suma sin cero (*non-zero-sum*), y los juegos de más personas (*more-person*).

Russian Chemical Reviews. Nº 1, compilado por J. N. Agar, R. H. Prince y A. R. Katritzky. 51 págs. The Chemical Society, Londres. £12 anuales.

Traducción de la revista rusa Успехи Химии publicada mensualmente de modo que corresponda con el original ruso, dirigido por V. V. Korshak. Los cinco o seis artículos de cada número revistan recientes investigaciones rusas y, a veces, chinas. Los trabajos del primer número de la traducción tratan, entre otras cosas, de la acción química de las ondas ultrasónicas sobre las moléculas (I. E. El'piner), los hidruros de metales de las tierras raras (V. I. Mikheeva y M. E. Kost) y la química de los derivados quinuclidínicos (M. V. Rubtsov, E. E. Mikhlina y L. N. Yakhontov).

KRUYT, H. R. y OVERBEEK, J. T. G.: *An Introduction to Physical Chemistry for Biologists and Medical Students.* (Traducción del holandés al inglés de A. J. Mee en colaboración con J. E. Spice.) IX + 197 págs. William Heinemann Ltd., Londres. 1960. 25s.

Se subraya en este libro la ciencia de los coloides: en términos generales sólo trata de esos aspectos de la química física necesarios para la comprensión de la ciencia coloidal. Incluyen: la presión osmótica, la velocidad de reacción y los fenómenos electrocinéticos. El último tercio del libro trata de la ciencia coloide misma.

HAIS, I. M. y MACEK, K.: *Handbuch der Papierchromatographie*, Vol. II. XXIV + 726 págs. Gustav Fischer Verlag, Jena, 1960. DM. 44.

El primer volumen de este manual contenía el texto; éste presenta la bibliografía e índices. Contiene 10 290 referatas, subdivididas en pequeños grupos, que tratan de la cromatografía en papel aplicada a una gran variedad de sustancias.

KUNIN, R.: *Elements of Ion Exchange.* IX + 164 págs. Reinhold Publishing Corporation, Nueva York; Chapman and Hall Ltd., Londres. 1960. 46s.

Este libro se propone suministrar un conocimiento básico de la técnica del intercambio iónico para los lectores con escasa preparación en química. Los temas tratados incluyen la estructura y síntesis de las sustancias de intercambio iónico, los principios generales de la aplicación de esta técnica y su uso en hidrometalurgia y campos afines.

The Effects of Pollution on Living Material. Edición preparada por W. B. Yapp. XII + 154 págs. The Institute of Biology, Londres. 1959. 25s.

Este simposio, octavo de los organizados por el *Institute of Biology* se reunió en Londres en 1958 y las memorias en él presentadas tratan de problemas locales tales como la condición general de los ríos en Gran Bretaña, aunque la mayoría se ocupan de temas de interés más general, como los efectos de la contaminación del aire sobre el crecimiento de las plantas y sobre el hombre, la absorción de productos de fisión por las plantas, la relación entre la contaminación y la abundancia de animales en los estuarios y la fluorosis en los animales de granja.

Methods of Biochemical Analysis, Vol. VIII. Edición dirigida por D. Glick. IX + 400 págs. Interscience Publishers Inc., Nueva York; Interscience Publishers Ltd., Londres. 1960. 75s.

Los temas de los trabajos de este volumen incluyen la determinación cuanti y cualitativa de los ácidos grasos por medio de la cromatografía de gas-líquido, la medida de la luciferina y luciferasa, el aislamiento y determinación de los ácidos neuramínicos y la determinación de porfirinas en sustancias biológicas.

POSTMA, C.: *Plant Marvels in Miniature; a Photographic Study.* 173 págs. George G. Harrap & Co. Ltd., Londres. 1960. 45s.

Las fotografías de este libro están ordenadas en series de modo que muestren, por ejemplo, las raíces, las distintas partes de *Tradescantia virginiae* y yemas de hojas, bajo crecientes aumentos hasta 3000 magnificaciones en algunos casos. Las fotografías son grandes y persiguen un efecto estético, van además acompañadas de un texto científico descriptivo.

SMITH, K. M.: *Plant Viruses* (3ª edición). XII + 209 págs. Methuen & Co. Ltd., Londres. 1960. 16s. 6d.

La primera de las dos principales secciones de este libro trata de los principios básicos de la virología vegetal y de los medios que han servido para la adquisición de esos conocimientos. La segunda contiene un estudio conciso de los métodos prácticos de estudio, aunque no se intenta una descripción detallada de técnicas tan especializadas y complicadas como las que se necesitan en la microscopía electrónica de los virus. El libro está destinado a los estudiantes que no poseen conocimientos previos en esta materia.

YONGE, C. M.: *Oysters.* XIV + 209 págs. Collins, Londres. 1960. 21s.

Este libro se propone suministrar un estudio equilibrado sobre las ostras y sus capítulos tratan de la estructura, funciones y hábitos de esos animales, de su utilización como alimento y de su cultivo, con datos históricos sobre las técnicas modernas.

KIRSCHENBAUER, H.: *Fats and Oils* (2ª edición). VI + 240 págs. Reinhold Publishing Corporation, Nueva York; Chapman and Hall Ltd., Londres. 1960. 56s.

Al revisar la anterior edición, el autor se ha propuesto conservar el reducido tamaño del libro, incorporando, al mismo tiempo, los más recientes datos sobre la estructura química, los métodos de procesado y el uso de aceites y grasas tanto animales como vegetales. Entre los temas tratados están la autoxidación, la ranciedad, el colesterol en el régimen alimenticio, la hidrogenación selectiva y los agentes de secuestro.

Notas sobre los colaboradores

C. G. BUTLER

Nació en 1913 y estudió en el *Queens' College* de Cambridge, donde obtuvo un grado en ciencias naturales. Pasó luego otros cinco años en Cambridge realizando investigaciones entomológicas; en enero de 1934 fue nombrado Jefe Entomólogo de la Sección Apícola de la Estación Experimental de Rothamsted, sección que pasó a ser un departamento independiente en 1944, del cual fue también designado Jefe. La mayoría de sus trabajos científicos tratan de la fisiología y conducta de *Apis melis;* es autor de dos libros y ha colaborado en un tercero.

M. K. McQUILLAN

Nació en 1921 e ingresó en Cambridge en 1939. Al graduarse en 1942 se incorporó en la División de Metalurgia del *Royal Aircraft Establishment*, donde se interesó especialmente en los metales más raros, comenzando con el titanio. Continuó luego sus trabajos sobre este metal en los Laboratorios de Investigación Aeronáutica de Melbourne y en la División de Metales de *Imperial Chemical Industries Limited.* Como jefe de un equipo encargado de la investigación y producción en pequeña escala de «nuevos» metales, sus trabajos recientes se han extendido a otros metales raros, entre ellos los utilizados en la industria nuclear.

T. W. FARTHING

Estudió en el *Jesus College* de Cambridge desde 1945 a 1951, cuando ingresó en la División de Metales de *Imperial Chemical Industries Limited.* Ha trabajado en el Departamento de Investigación sobre problemas de corrosión y otros relacionados con la producción de tubos de cobre y latón. Más tarde se especializó en el estudio de metales «nuevos» y fue trasladado desde el comienzo al equipo encargado de producir berilio para su uso en la industria nuclear.

A. L. KURSANOV

Nació en Moscú en 1902 y se graduó en la Universidad de Moscú en 1927, después de especializarse en fisiología vegetal y en bioquímica. Realizó sus primeras investigaciones bajo la dirección de su padre, L. Kursanov, y de F. Krasheninnikov sobre la fisiología de las plantas enfermas. Recibió el Doctorado en Ciencia Biológica en 1940 después de defender una tesis sobre «La acción de las enzimas en las plantas vivas». En 1953 fue elegida Miembro de la Academia de Ciencias de la U.R.S.S. Fue Jefe de Laboratorio en el Instituto Bakh de Bioquímica desde 1940 a 1952. En ese año fue nombrado Director del Instituto K. A. Timiriazev de Fisiología Vegetal de la Academia de Ciencias de la U.R.S.S., Moscú. Sus principales intereses científicos son la translocación de las sustancias orgánicas en las plantas, el metabolismo en las raíces en relación con la absorción de iones, y la biosíntesis y la función fisiológica de las catequinas en el te.

G. C. BARKER

Nació en Goole, Yorkshire, en 1915 e ingresó en la Universidad de Cambridge en 1933 iniciando sus investigaciones en 1937 sobre electroquímica en el Departmento de Química Física. Durante la guerra se ocupó principalmente en trabajos sobre el radar en el Establecimiento de Investigación sobre Telecomunicaciones en Malvern; desde 1946 ha trabajado en la *United Kingdom Atomic Energy Authority*, primero en Chalk River, Ontario, y más tarde en Harwell. En años recientes ha estudiado el desarrollo de nuevos métodos polarográficos y la aplicación de las técnicas electrónicas a problemas electroquímicos fundamentales.

G. W. C. MILNER

Nació en Doncaster, Yorkshire, en 1918 y estudió en la Universidad de Sheffield (1936–40). Durante la guerra fue empleado por el Almirantazgo en trabajos en el Laboratorio Bragg de Sheffield sobre problemas relacionados con la aplicación de técnicas físico-químicas a la química analítica. Después de un breve período de profesorado en la Universidad de Hull (1946–48) retornó al Laboratorio Bragg desde donde fue luego trasladado a Harwell en 1951. Allí se dedica al estudio de problemas de química analítica, incluyendo las aplicaciones de los polarógrafos de onda cuadrada y de pulsación.

T. F. GOREAU

Nació en 1924 y estudió en las Universidades de Clark y de Yale. En la actualidad es Profesor de Fisiología en la Universidad de Jamaica, donde ha enseñado desde 1951. También colabora con el Departamento de Ecología y Bioquímica Marinas de la *Zoological Society* de Nueva York. Se interesa principalmente en problemas de esqueletogénesis en los corales de arrecife y realiza estudios submarinos ecológicos sobre las estructuras comunales en los arrecifes de las Indias Occidentales, así como sobre las correlaciones entre los factores fisiológicos y ambientales que influyen sobre la calcificación de los corales.

E. GLUECKAUF

Nació en 1906 y estudió química en la Universidad de Berlin y en la *Technische Hochschule* de esa ciudad. Posteriormente realizó investigaciones con F. A. Paneth, primero en el *Imperial College* de Londres y luego en Durham. En 1947 se incorporó al *Atomic Energy Research Establishment* de Harwell, donde constituyó el Grupo de Físico-Química. Se interesa principalmente en la teoría de la cromatografía y en el intercambio iónico, los microconstituyentes de la atmósfera y en campos especializados de la radiactividad. Es ahora Jefe Científico Adjunto de Harwell, a cargo de la rama de Radio-química.